

**ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Факультет інженерно-технологічний**  
**Кафедра механічної та електричної інженерії**

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти

*магістра*

на тему: **«Підвищення ефективності процесу точіння заготовок за рахунок  
коригування режимів різання»**

КРМ.133ГМмз\_21.01\_000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти  
за освітньо-професійною програмою  
*Машина і засоби механізації  
сільськогосподарського виробництва»*  
*спеціальності 133 «Галузеве  
машинобудування»*

ступеня вищої освіти *магістр*  
групи *133ГМмз\_21*  
ВОЙНОВСЬКИЙ Володимир

Керівник: канд. техн. наук, доцент  
БІЛОБОД Олександра

**Полтава – 2025 року**

## ВСТУП

*Актуальність теми дослідження.* Одним з актуальних завдань є визначення режиму механічної обробки, який істотно впливає на продуктивність, якість і вартість виготовлення деталей. Тому завдання визначення раціонального режиму різання є актуальним. Раціональним методом призначення елементів режиму обробки є їх розрахунок з використанням моделей і залежностей для визначення вихідних параметрів процесу. Однак математичні моделі, що дозволяють розрахувати вихідні параметри в залежності від вхідних, не завжди забезпечують коректні результати. Багато з них не враховують наявність ряду керованих і некерованих факторів. У багатьох випадках відсутні відомості для вибору параметрів математичних моделей, таких як коефіцієнти тертя в зонах контакту інструменту зі стружкою і заготовкою. Багато моделей отримані на основі емпіричних даних і показують достовірні результати тільки в тих умовах, в яких вони були отримані.

Не всі залежності та моделі враховують, що параметри процесу механічної обробки змінюються в часі. Відомі методики призначення режиму різання розглядають процес обробки заготовок різанням як стаціонарний процес. Однак такі фактори, як знос ріжучого інструменту, сили різання і температура, фізико-механічні властивості матеріалів заготовки та інструменту, шорсткість, точність розмірів змінюються зі збільшенням часу роботи інструменту. На вихідні параметри процесу впливають некеровані фактори, такі як коливання припуску і механічних властивостей матеріалу заготовки, зміна жорсткості технологічної системи та ін.

Відсутність коректних математичних моделей і вихідних даних для визначення вихідних параметрів залежно від умов обробки, дія в ході обробки некерованих факторів призводять до невизначеності інформації. Ця невизначеність є причиною значної розбіжності між розрахунковими значеннями вихідних параметрів і їх дійсними (фактичними) значеннями, яка в деяких випадках становить 20...30% і більше [1]. В результаті, режим різання, отриманий за допомогою розрахунків, може виявитися далеким від оптимального, і тому на етапі налагодження технологічного процесу необхідна корекція призначеного режиму.

Тому виникає необхідність у розробці методики корекції режиму різання, що враховує, що зміна кожного з керованих факторів відбивається на зміні практично всіх вихідних параметрів процесу обробки.

В якості досліджуваного методу обробки обрано процес точіння. Обробка заготовок точінням за трудомісткістю займає 30% від загальної трудомісткості механічної обробки [2]. Сучасні токарні верстати з ЧПУ забезпечують точність розмірів до 6-го квалітету і шорсткість обробленої поверхні за параметром  $R_a$ , який дорівнює 0,80 мкм [3, 4].

*Об'єкт розробки* – процес точіння металевих заготовок під час технологічної обробки на верстатах з різальним інструментом

*Предмет розробки* – режими різання під час точіння та їх вплив на продуктивність і стабільність обробки.

Не дивлячись на дослідження, відсутні методики корекції режиму процесу різання зі змінними параметрами, які враховують, що зміна кожного з керованих факторів відбивається на зміні практично всіх вихідних параметрів процесу.

*Мета кваліфікаційної роботи* полягає в розробці методики корекції режиму механічної обробки, що дозволяють підвищити продуктивність операцій механічної обробки при забезпеченні необхідної якості деталей.

У ході виконання даної роботи передбачається виконати наступні завдання:

1. Розробити методику корекції режиму точіння при різних співвідношеннях заданих і фактичних значень вихідних параметрів і план варіювання керованими параметрами (факторами), що використовується для наближення керованих факторів до оптимального рівня і для активізації вивчення процесу з метою корекції математичних моделей.

2. Розробити математичні залежності та моделі для розрахунку вихідних параметрів і поточних показників процесу точіння та полів їх розсіювання.

3. Розробити методику визначення вихідних параметрів, що змінюються в часі, та поточних показників процесу точіння.

4. Розробити моделі, алгоритми та програмне забезпечення для корекції призначеного режиму точіння.

5. Оцінити ефективність розроблених методик корекції режиму на основі аналізу результатів їх функціонування в лабораторних і виробничих умовах.

*Наукова новизна дослідження:*

1. Методика корекції режиму різання при різних співвідношеннях заданих і фактичних значень вихідних параметрів, що включає план варіювання керованими параметрами з метою адаптації (корекції) моделей процесу і наближення керованих параметрів до оптимального значення.

2. Математичні моделі та залежності для розрахунку тангенціальної складової сили різання, температурного поля, шорсткості обробленої поверхні та полів їх розсіювання і розрахунку похибки діаметрального розміру деталі.

*Основні положення, що виносяться на захист:*

1. Методики корекції режиму при різних співвідношеннях заданих і фактичних значень вихідних параметрів, в тому числі з урахуванням зміни поточних і вихідних параметрів процесу в часі.

2. Методика визначення змінних у часі параметрів процесу на основі розробки алгоритму його функціонування.

3. Результати чисельного моделювання тангенціальної складової сили різання і температур на передній і задній поверхнях інструменту.

4. Результати експериментальних досліджень ефективності розроблених методик корекції режиму точіння.

*Практичне значення кваліфікаційної роботи магістра:*

1. Розроблено алгоритми для корекції режиму точіння.

2. Результати експериментальних досліджень і дослідно-промислового випробування ефективності розроблених методик корекції режиму показали, що їх застосування дозволяє підвищити продуктивність процесу точіння на 25-35% при забезпеченні заданої якості деталей.

*Достовірність отриманих результатів* підтверджується використанням сучасного обладнання, атестованих методик досліджень, значною кількістю експериментальних даних, застосуванням статистичних методів обробки результатів і зіставленням отриманих результатів з роботами інших авторів.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 1.1 Управління процесом обробки за результатами моніторингу вхідних, вихідних і поточних параметрів

Процес призначення режимів різання визначає продуктивність, якість і вартість виготовлення деталей. Розрахункові методи ґрунтуються на моделях, які часто не враховують вплив різки керованих і некерованих факторів. Бракує достовірних даних для вибору параметрів цих моделей, а багато залежностей отримані емпірично та забезпечують точність лише в умовах, у яких вони були сформовані. Параметри процесу змінюються в часі через зношування інструмента, зміну сил різання, температури, властивостей матеріалів та нестабільність технологічної системи. Некеровані фактори, такі як коливання припуску та механічних характеристик заготовок, підвищують невизначеність. Це спричиняє значні розбіжності між розрахунковими та фактичними значеннями вихідних параметрів, що досягають 20-30%. Режими різання, визначені розрахунком, часто відхиляються від оптимальних, тому під час налагодження процесу потрібна їх корекція. Потрібна методика коригування режимів, яка врахує взаємний вплив керованих факторів на всі вихідні параметри обробки.

Управління точністю процесу механічної обробки заготовок різанням здійснюють за вхідними і вихідними даними та за поточними параметрами (показниками) процесу обробки (сили і температури різання). У науково-технічній літературі управління за поточними силовими параметрами часто позначають як «управління пружними переміщеннями». Управління процесом обробки за результатами моніторингу вхідних даних дозволяє зменшити поле розсіювання випадкових похибок, пов'язаних з коливаннями припуску і твердості поверхневого шару заготовки [5].

Можна попередньо виміряти розміри і твердість всіх заготовок в партії і розсортувати їх на групи: за твердістю і за величиною припуску. Налаштування верстата на розмір регулюється на основі результатів вимірювань перед обробкою заготовок кожної з груп. Недоліком даного методу є його трудомісткість,

організаційна складність, великі витрати часу, а також відсутність достовірних залежностей для розрахунку вихідних параметрів.

Основний принцип адаптивного управління полягає в постійному підтриманні оптимальних характеристик процесу обробки. Для досягнення цієї мети металообробні верстати оснащуються набором чутливих елементів і перетворювачів. Виміряні значення параметрів процесу порівнюються із заданими, і в разі розбіжності визначається необхідна поправка за величиною і знаком [6].

Перевагою використання подачі як керованого параметра є те, що вона дає можливість створення гнучкого і чутливого механізму управління пружними деформаціями технологічної системи. Поправка вноситься за рахунок впливу на пружні переміщення технологічної системи [7]. Оператор верстата може здійснювати управління подачею вручну або використовувати систему автоматичного управління (САУ). Недоліком методу є вплив подачі на інші вихідні параметри процесу обробки (наприклад, можна отримати неприпустимі значення параметрів мікрогеометрії або параметрів якості поверхневого шару).

У САУ закладені «жорсткі» моделі та алгоритми вироблення керуючого впливу; контроль вихідних параметрів, а також підлаштування керованих параметрів здійснюється автоматично.

Використання спеціального обладнання при оснащенні верстатів САУ може призвести до значного збільшення вартості, збільшення складності налаштування та ремонту обладнання, витрат на його обслуговування [8]. Крім того, застосування більшості систем автоматичного управління обмежене кількістю параметрів, які можна контролювати для вироблення керуючого впливу. У більшості випадків в технологічній системі контролюються параметри шорсткості  $R_a$  і/або пружних деформацій елементів  $A$  для забезпечення ефективного управління вибирається тільки один параметр, який становить основу процесу – подача. Однак, якщо орієнтуватися виключно на один контрольований параметр, при управлінні процесом, виникає потенційна загроза отримання неприйнятних значень інших параметрів.

Управління точністю за вихідними даними базується на проведенні систематичних вимірювань розмірів або інших параметрів якості оброблених

поверхонь, за результатами яких проводиться періодичне налаштування верстата. Це вимагає зупинки верстата, проведення вимірювань, отже, призводить до простою обладнання.

Для автоматизації даного процесу використовуються прилади активного контролю та автоналагоджувачі. Автопідлаштувачі дозволяють визначати момент необхідного підлаштування в процесі роботи верстата без його зупинки, ґрунтуючись на машинному часі або фактичному шляху різання. Також, підлаштування може здійснюватися за допомогою регулярних вимірювань розмірів заготовок з використанням контактних або безконтактних вимірювальних пристроїв. Автопідлаштувач подає сигнал виконавчим органам верстата для переміщення інструменту на певне значення, компенсуючи систематичні похибки. Ця величина в основному залежить від інтенсивності зносу і затуплення інструменту [9].

Система управління процесом точіння із зворотним зв'язком була розроблена науковою групою з Італії [10]. Ця система здатна автоматично коригувати величину зносу інструменту і прогин заготовки шляхом зміни вхідних параметрів (глибини різання і подачі) в залежності від поточних значень шорсткості і зносу різця.

На режими різання значний вплив має марка матеріалу заготовки, матеріал ріжучої частини інструменту, умови і вид обробки, температура в зоні різання, склад і техніка подачі мастильно-охолоджуючої рідини. Дана САУ дозволяє підтримувати температуру різання на постійному оптимальному рівні (або відповідну їй термо-ЕРС). Для забезпечення необхідного рівня зазначених вихідних параметрів необхідно забезпечити відхилення від рівня оптимальної температури різання не більше 200°C, а відхилення термо-ЕРС не більше 0,5 мВ.

Система має такі недоліки: технологічно складно забезпечити вищезазначене відхилення термо-ЕРС; шунтуюча дія стружки; виникнення паразитної термо-ЕРС «різальна пластина-держак».

Управління точністю механічної обробки за вихідними даними дозволяє компенсувати постійні та змінні систематичні похибки. Недоліком методу є обмеження умов застосування автоналаштувальників (повинні бути забезпечені висока однорідність властивостей матеріалу заготовки, розмірів заготовки і

періоду стійкості PI), простої обладнання при ручному налаштуванні, а також те, що даний метод не дозволяє компенсувати випадкові похибки.

Врахувати варіабельність властивостей матеріалів заготовки та PI при призначенні режиму різання можливо за рахунок введення додаткових незалежних змінних у математичні моделі, які визначаються безпосередньо у виробничих умовах [11]. У роботах [12, 13] запропоновано методику розрахунку швидкості різання, шорсткості обробленої поверхні та складових сил різання з урахуванням інформації про властивості контактної пари «твердосплавний інструмент – заготовка» (вимірювання величини термо-ЕРС). Однак, для вимірювання величини термо-ЕРС слід провести обробку заготовки (пробний прохід), що сприяє збільшенню тимчасових і матеріальних витрат на виробництво деталі.

## 1.2 Методи та методики визначення режиму точіння

Одним з найважливіших завдань, що вирішуються при розробці технологічних процесів (ТП) металообробки, є визначення раціональних режимів різання. Режим різання (глибина різання  $t_r$ , подача  $S_{\text{об}}$  і швидкість різання  $v$ ) впливає на продуктивність обробки, якість і вартість виготовлених деталей.

Для визначення режиму точіння використовують такі методи: табличний, розрахунковий (аналітичний), графоаналітичний. При використанні табличного методу орієнтуються на нормативи режимів різання. Вихідними даними є фізико-механічні характеристики заготовки, припуск на обробку, матеріал ріжучої частини інструменту і конструктивно-геометричні параметри самого інструменту. Визначення режиму різання табличним методом відбувається в такій послідовності [14]:

1. Спочатку визначається глибина різання.
2. Потім здійснюється розрахунок подачі:
  - а)  $S_{\text{шорст}}$  – подача, що забезпечує необхідну шорсткість обробленої поверхні,
  - б)  $S_{\text{жорст}}$  – враховуюча жорсткість оброблюваної заготовки;

с) в)  $S_{\text{міц.р.}}$  – допустима міцністю ріжучого інструменту.

В якості технологічно допустимої  $S_T$  вибирається мінімальна подача з розрахованих  $S_{\text{шорст.}}$ ,  $S_{\text{жорст.}}$ ,  $S_{\text{міц.р.}}$ . Після цього проводять корекцію подачі виходячи з технологічних можливостей верстата.

3. Вибирають швидкість різання  $v$  і розраховують частоту обертання заготовки  $n$ .

4. На основі значень  $n$  і  $S_T$  визначають ефективну потужність, що витрачається на різання  $N_{\text{різ.}}$  і необхідну потужність електродвигуна верстата:

$$N_{\text{дв}} = N_{\text{різ.}} / \eta_{\text{дв.}} \quad (1.1)$$

де  $N_{\text{дв}}$  – потужність, що споживається електродвигуном верстата для виконання даної операції (переходу), кВт;  $\eta_{\text{дв}}$  – коефіцієнт корисної дії (ККД) механізму головного приводу двигуна (дані, зазвичай, надається у паспорті двигуна), значення коефіцієнта можна брати  $\eta_{\text{дв}} = 0,7 \dots 0,9$ .

При розрахунковому методі етапи визначення режиму точіння аналогічні табличному методу, але мають ряд таких особливостей [15, 16]:

1. Визначення глибини різання  $t_r$ .
2. Призначення величини подачі  $S_{\text{об}}$

У роботі [17] запропоновано таку послідовність розрахунку подачі  $S_{\text{об}}$ :

а) розрахунок подачі  $S_{\text{шорст.}}$ , яка забезпечує задану величину шорсткості:

$$S_{\text{шорст.}} \leq \frac{k_0 \cdot Ra^{k_1} \cdot v^{k_2} \cdot r^{k_3} \cdot HB^{k_4}}{t_r^{k_5} \cdot \varphi^{k_6} \cdot \varphi_1^{k_7}} \quad (1.2)$$

де  $k_0, k_1, \dots, k_7$  – поправочні коефіцієнти;  $Ra$  – середнє арифметичне відхилення профілю, мкм;  $v$  – швидкість різання, м/хв;  $r$  – радіус при вершині різця, мм;  $t_r$  – глибина різання, мм;  $\varphi, \varphi_1$  – головний і допоміжний кути в плані, град.;  $HB$  – твердість матеріалу заготовки.

б) знаходять подачу, допустиму міцністю ріжучого інструменту [17]:

$$S_{\text{міц.р.}} \leq \frac{x_{Pz} \sqrt{\frac{B^2 \cdot H \cdot [\sigma_{зг}]}{Y_{Pz}'} }}{\sqrt{6 \cdot C_{Pz} \cdot l_p \cdot t_r}} \quad (1.3)$$

де  $B$  – ширина державки різця, мм;  $H$  – висота державки різця, мм;  $[\sigma_{зг}]$  – допустима напруга на вигин матеріалу державки різця, МПа;  $l_p$  – виліт різця з різцетримача, мм;  $C_{P_z}$ ,  $Y_{P_z}$  - емпіричні коефіцієнти.

в) знаходять подачу, допустиму за жорсткістю заготовки:

$$S_{\text{жорст.}} \leq \sqrt[3]{\frac{\varepsilon \cdot J \cdot E \cdot f'}{1,1 \cdot C_{P_z} \cdot l_D^3 \cdot Y_{P_z}}} \quad (1.4)$$

де  $\varepsilon$  – коефіцієнт жорсткості (вибирається залежно від способу установки заготовки на верстаті);  $J$  – момент інерції перерізу заготовки,  $\text{мм}^4$ ;  $E$  – модуль пружності матеріалу заготовки, МПа;  $f'$  – допустимий вигин заготовки при обробці, мм;  $l_D$  – виліт заготовки з токарного патрона (при закріпленні її консольно) або відстань між точками закріплення заготовки, мм.

З подач, розрахованих за залежностями (1.1) – (1.4), приймають мінімальну.

У роботі [18] для попереднього вибору подачі запропоновано таке співвідношення:

$$5 < \frac{t_r}{S_{0c}} < 10, \quad (1.5)$$

Залежно від вимог до якості та продуктивності обробки дане співвідношення може незначно змінюватися.

3. Задають період стійкості ріжучого інструменту (PI) за довідковими даними залежно від умов обробки.

4. Визначають швидкість різання  $v$  і складові сили різання (тангенціальну  $P_z$ , радіальну  $P_y$ ) за емпіричними залежностями.

5. Вибирають модель верстата.

Цей метод розрахунку режиму різання застосовується, коли відсутні обмеження у виборі моделі верстата.

Визначення режиму різання графоаналітичним методом реалізується в такій послідовності:

- 1) Визначення кількості проходів і глибини різання.
- 2) Вибір відповідного інструментального матеріалу і визначення конструктивно-геометричних параметрів PI.

3) Для визначення технологічної подачі розраховуються лімітуючі подачі за відповідними залежностями і мінімальну з них вибирають в якості технологічної  $S_{\tau}$ .

4) На останньому етапі приступають до побудови графіка «лінія верстата – лінія інструменту».

Найбільш ефективним з перерахованих вище методів є розрахунковий метод, заснований на використанні аналітичних і емпіричних залежностей. Однак, дані залежності не враховують вплив на вихідні параметри багатьох вхідних і поточних параметрів процесу, наприклад зносу інструменту, температур в зоні обробки і температурних деформацій елементів технологічної системи, вплив СОЖ та інших параметрів. У багатьох випадках відсутні необхідні дані для розрахунку і ті використовуються для вибору параметрів математичних моделей, наприклад, коефіцієнта тертя в зоні контакту інструменту із заготовкою, параметрів механічних і теплофізичних значень інструментального та оброблюваного матеріалів тощо. Крім того, в процесі обробки діє низка некерованих факторів (коливання припусків і механічних властивостей матеріалу заготовки).

Всі перераховані вище методи розглядають процес різання як стаціонарний і не враховують зміну параметрів процесу в залежності від часу роботи інструменту. Тому призначений режим обробки не буде раціональним, оскільки розрахункові значення вихідних і поточних параметрів процесу різання можуть істотно відрізнятись від фактичних значень.

Для визначення раціонального режиму обробки необхідно розробити методику, яка враховує нестационарність процесу різання, а також передбачає можливість корекції елементів режиму різання на основі поточної інформації про вихідні параметри, компенсуючи різницю між фактичним і розрахунковим значеннями вихідного параметра.

### 1.3 Методи моделювання обмежень продуктивності точіння

У процесі різання виникає ряд обмежень які визначаються різними факторами, такими як технологія, фізика та механіка процесу [19]. При чорнових режимах основними обмеженнями є допустима сила різання  $P$ , міцність і жорсткість інструменту, деталей і вузлів верстата, потужність двигуна верстата. Зі збільшенням  $P$  зростають деформації заготовки та інструменту, посилюються вібрації, знижуються точність і якість обробки, збільшується споживана потужність.

Найбільший вплив на силу різання має глибина різання  $t_r$ , меншою мірою впливає подача  $S_{об}$  і найменшою мірою – швидкість різання  $v$ . Зі збільшенням швидкості сила різання може навіть дещо знижуватися, через підвищення температури в зоні різання і зменшення твердості та міцності матеріалу зрізаного шару.

При чистових режимах основне завдання полягає в забезпеченні необхідної якості поверхневого шару і точності обробленої деталі.

В якості цільової функції використовують максимальну продуктивність обробки:  $n \cdot S_{об} \rightarrow \max$  (де  $n$  – частота обертання шпинделя верстата, об/хв).

Для точіння в роботах [20, 21] пропонуються такі обмеження:

1. За гранично допустимою потужністю різання  $N_{різ}$ , обумовленою потужністю електродвигуна приводу головного руху верстата  $N_{дв}$ :

$$N_{різ} \leq N_{дв} \cdot \eta_{дв}, \quad (1.6)$$

2. За міцністю державки різця:

$$\frac{\sigma \cdot P_z \cdot l_p}{B \cdot H^2} \leq [\sigma_H], \quad (1.7)$$

де  $l_p$  – виліт різця з різцетримача, мм;  $B$  – ширина державки різця, мм;  $H$  – висота державки різця, мм;  $[\sigma_H]$  – допустима напружка на згин для матеріалу державки різця, МПа.

3. За гранично допустимими діапазонами частоти обертання шпинделя і подачі:

$$n_{min} \leq n \leq n_{max}, S_{min} \leq S_{об} \leq S_{max}, \quad (1.8)$$

4. Обмеження щодо гранично допустимої шорсткості обробленої поверхні  $R_a$ :

$$R_a \leq R_a^{max}, \quad (1.9)$$

де  $R_a$  – розрахункове значення параметра шорсткості, мкм;  $R_a^{max}$  – задане (регламентоване) значення параметра шорсткості, мкм.

5. Обмеження щодо точності обробки [22]:

$$P_y \cdot \left[ \left( \frac{1}{j_{заг}} + \frac{1}{j_{верс}} + \frac{1}{j_p} \right) \right] \leq K_\delta \cdot \frac{\delta}{2}, \quad (1.10)$$

де  $P_y$  – радіальна складова сили різання, Н;  $j_{заг}$  – жорсткість заготовки, Н/мм;  $j_{верс}$  – жорсткість верстата, Н/мм;  $j_p$  – жорсткість інструменту, Н/мм;  $K_\delta$  – коефіцієнт, що показує, яку частину допуску повинна скласти похибка, спричинена деформацією заготовки, різця та верстата ( $K_\delta = 0,7 \dots 0,8$ );  $\delta$  – допуск діаметрального розміру обробленої заготовки (деталі), мм.

6. Обмеження щодо допустимої температури різання:

$$T_{різ} \leq T_{доп}, \quad (1.11)$$

де  $T_{різ}$  – температура різання, °С;  $T_{доп}$  – допустима температура різання, °С (можна прийняти рівню теплостійкості матеріалу ріжучої частини PI).

Максимальна температура при точінні виникає на передній поверхні різця. Температуру різання  $T_{різ}$  можна розрахувати за залежностями розрахунку температури на передній поверхні різця, наведеними в п. 3.3.2.

7. Обмеження за температурою, при якій в поверхневому шарі заготовки формуються розтягуючі теплові залишкові напруги:

$$T_{ОН} = \frac{\sigma_{St}}{(\alpha_p \cdot E)} + T_{II} \leq T_{заг}, \quad (1.12)$$

де  $T_{ОН}$  – температура нагрівання металу поверхневого шару, в разі перевищення якої в ньому виникають теплові залишкові напруги розтягування, °С;  $\alpha_p$  – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу заготовки,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $E$  – модуль пружності матеріалу заготовки, МПа;  $T_{II}$  – початкова температура нагрівання, °С;  $T_{заг}$  – температура поверхневого шару заготовки, °С.

Для чорнового точіння особливо важливі обмеження по міцності пластини і міцності держака різця, а для чистового – обмеження по гранично допустимій шорсткості і точності обробки. Обмеження по точності обробки [23] враховує

лише вплив пружних деформацій технологічної системи, не враховує вплив температурних деформацій, похибок налаштування на розмір та ін.

**Мета кваліфікаційної роботи** полягає в розробці методики корекції режиму механічної обробки, що дозволяють підвищити продуктивність операцій механічної обробки при забезпеченні необхідної якості деталі.

У ході виконання даної роботи передбачається виконати наступні **завдання**:

1. Розробити методики корекції режиму точіння при різних співвідношеннях заданих і фактичних значень вихідних параметрів і план варіювання керованими параметрами (факторами) що використовується для наближення керованих факторів до оптимального рівня і для активного вивчення процесу з метою корекції математичних моделей.

2. Розробити математичні залежності та моделі для розрахунку вихідних параметрів і поточних показників процесу точіння та полів їх розсіювання.

3. Оцінити ефективність розроблених методик корекції режиму на основі аналізу результатів їх функціонування в лабораторних і виробничих умовах.

### **Висновки до розділу 1**

1. Ефективним методом призначення режиму обробки є його розрахунок з використанням залежностей і математичних моделей (формул теорії різання). Але варто зазначити, що ці математичні моделі, що описують взаємозв'язок між вихідними і вхідними параметрами процесів механічної обробки, не завжди точно відображають цей зв'язок. Багато моделей отримані за умови ряду припущень і не враховують вплив на процес всіх керованих і некерованих факторів. Часто відсутні необхідні дані для вибору відповідних параметрів математичних моделей. Крім того, в процесі обробки діє ряд некерованих факторів (коливання фізико-механічних властивостей заготовок, припусків та ін.). Тому режим, розрахований з використанням формул теорії різання, може бути далеким від оптимального.

2. Перспективним напрямком є застосування автоматизованих систем управління процесом точіння.

## РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

### 2.1 Модель процесу механічної обробки

Процес механічної обробки визначається як вихідними і поточними параметрами  $Y_i$ , так і вхідними (див. рис. 2.1). Вхідні параметри включають в себе керовані контрольовані параметри  $X_j$ , некеровані контрольовані параметри (фактори)  $Z_k$  і некеровані неконтрольовані параметри (фактори)  $W_n$ .

Рисунок 2.1 – Параметри процесу механічної обробки

Зі збільшенням часу роботи інструменту змінюється (збільшується) його знос, що викликає зміну сили і температури. З іншого боку, показники стану інструменту безпосередньо залежать від параметрів обробки, таких як сила і температура. Отже, взаємний вплив параметрів процесу призводить до нестачі інформації при розрахунку вихідних параметрів за відомими моделями.

Час функціонування процесу обробки розбивається на інтервали  $\Delta t$ :

$$\Delta t = \frac{\tau_c}{n_{p.t.}}, \quad (2.1)$$

де  $n_{p.t.}$  – число розрахункових точок.

Вихідні та поточні параметри процесу визначаються для моментів часу  $\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_i, \dots, \tau_{max}$  ( $\tau_{max}$  – максимальний час функціонування процесу).

Для корекції режиму різання потрібна додаткова інформація. Необхідно розробити план варіювання керованими параметрами таким чином, щоб була можливість отримати додаткову інформацію для корекції режиму різання і наблизити керовані параметри до оптимального значення.

На першому етапі ми використовуємо математичні моделі процесу, що пов'язують його вихідні параметри  $Y_i$  з керованими ( $X_j$ ), а також некерованими ( $Z_k$ ) і неконтрольованими ( $W_n$ ) параметрами. Потім створюємо систему обмежень наступного виду:

$$Y_i^{max} \geq Y(X_j, Z_k, W_n); Y_i^{max} \leq Y(X_j, Z_k, W_n), \quad (2.2)$$

де  $Y_i^{max}$  – задане значення вихідного параметра;  $Y \geq Y(X_j, Z_k, W_n)$  – фактичне значення вихідного параметра при певному поєднанні елементів режиму і умов обробки.

Обмеження можуть мати наступний вигляд:

$$Ra^{max} \geq Ra(X_1, X_2, \dots, X_i \dots; Z_1, Z_2, \dots, Z_i \dots; W_1, W_2, \dots, W_i), \quad (2.3)$$

$$\omega^{max} \geq \omega(X_1, X_2, \dots, X_i \dots; Z_1, Z_2, \dots, Z_i \dots; W_1, W_2, \dots, W_i \dots), \quad (2.4)$$

$$\tau_c^{max} \leq \tau_c(X_1, X_2, \dots, X_i \dots; Z_1, Z_2, \dots, Z_i \dots; W_1, W_2, \dots, W_i \dots), \quad (2.5)$$

де  $Ra^{max}$  – задане значення параметра шорсткості, мкм;  $\omega^{max}$  – задане значення похибки розміру, мм;  $\tau_c^{max}$  – заданий період стійкості ріжучого інструменту, хв.

Позначимо елементи режиму, отримані в результаті розрахунку або призначені відповідно до нормативів,  $X_1^0, X_2^0, X_j^0$ , де  $j$  – кількість змінних, що застосовуються для управління процесом різання. Для прийняття рішення про доцільність проведення корекції режиму, необхідно провести порівняння фактичних значень вихідних параметрів  $Y_j^{0\Phi}$ , які були зафіксовані при даних елементах режиму, з їх розрахунковими значеннями  $Y_j^{0P}$

$$Y_j^{0P} = f(X_1^0, \dots, X_j^0, \dots, X_n; Z_k, W_n), \quad (2.6)$$

де  $j$  – кількість керованих вхідних параметрів процесу.

Очевидно, що, якщо  $\frac{Y_{i0}^P - Y_{i0}^{\Phi}}{Y_{i0}^P} > \varepsilon$ , де  $\varepsilon$  – задана величина. Прийняли  $\varepsilon = 0,1$ , тобто, якщо різниця між розрахунковими і фактичними значеннями даного параметра перевищує 10%, то буде потрібна корекція режиму різання (прийняли з метою компенсації похибки, що вноситься засобами і методами вимірювання).

Резерв (запас) – це різниця між заданим значенням будь-якого вихідного параметра  $Y_i^{max}$  і його розрахунковим  $Y^P$  або фактичним значенням  $Y^Ф$ . Різниця  $(Y_i^{max} - Y^P)$  – це розрахунковий резерв, а  $(Y_i^{max} - Y^Ф)$  – фактичний резерв [24].

Якщо фактичне (розрахункове) значення вихідного параметра не досягло заданого значення, то резерв вважаємо позитивним; якщо фактичне (розрахункове) значення вихідного параметра перевищує задане значення – негативним.

Так, для параметра шорсткості  $R_a$ , резерв слід вважати позитивним, якщо розрахункове або фактичне значення  $R_a$ , менше його заданого значення  $R_a^{max}$ , тобто, якщо або  $R_a^P < R_a^{max}$ , або  $R_a^Ф < R_a^{max}$ . У зворотному випадку резерв вважаємо негативним.

При обробці можливі такі ситуації: всі фактичні резерви позитивні, всі резерви або частина резервів виявляться негативними; один або декілька фактичних резервів будуть дорівнювати нулю, а решта все ж будуть позитивними.

Для кожної з перерахованих вище ситуацій буде розроблений план гаріювання керованими параметрами.

## 2.2 Корекція режиму різання при позитивних значеннях резервів

У точці простору керованих змінних  $X_1^0, X_2^0, X_k^0$  слід розкласти математичні моделі процесу механічної обробки в ряд Тейлора і виключити члени другого і більш високих порядків.

Для спрощення розрахунку потрібно провести лінійну апроксимацію математичних моделей і привести їх до єдиного вигляду. Можливість виключення випливає з того, що розрахункові значення керованих параметрів, як правило, будуть близькими до їх оптимальних значень. Математичні моделі – обмеження приймуть вигляд:

$$Y_i = Y_i^{OP} + \left( \frac{dY_i}{dX_i} + \dots + \frac{dY_i}{dX_{k'}} \right) \cdot (\Delta X_{i,\dots}, \Delta X_{k'}) \quad , \quad (2.7)$$

або

$$Y_i = Y_i^{OP} + \frac{dY_i}{dX_i} \cdot \Delta X_1 + \dots + \frac{dY_i}{dX_{k'}} \cdot \Delta X_{k'} \quad (2.8)$$

Використовуючи позначення:

$$Y_i^{OP} = b_{i0}; \frac{dY_i}{dX_i} = b_{i1}, \dots, \frac{dY_i}{dX_k} = b_{ik'} \quad (2.9)$$

Отримаємо:

$$Y_i = b_{i0} + b_{i1} \cdot \Delta X_1 + \dots + b_{ik'} \cdot \Delta X_k \quad (2.10)$$

Для забезпечення оптимальних режимів різання необхідно, щоб один з резервів був рівний або близький до нуля, а вхідні параметри слід змінювати таким чином, щоб на кожній наступній ітерації резерв зменшувався і наближався до нуля. Це дозволить звузити область варіації керованих параметрів, наближаючи їх до їх оптимальних значень. Для знаходження коефіцієнтів лінійного рівняння необхідно провести не менше двох експериментів в яких змінюються значення кожного керованого параметра.

Оскільки значення вихідних параметрів  $Y_i^{OF}$  вже відомі в точці із заданими координатами  $X_1^0, X_2^0, \dots, X_k^0$ , для адаптації моделей необхідно додати ще одне значення до кожного з керованих параметрів. Це означає, що експеримент слід провести ще в  $k$  додаткових точках.

У процесі варіювання керованими параметрами передбачуваний резерв, який прагне до нуля ( $Y_0^{max} - Y_0^{OF}$ ), може бути розділений на  $k'$  інтервалів при позитивних значеннях інших резервів. Для того, щоб величина відповідного вихідного параметра змінилася на величину  $(Y_0^{max} - Y_0^{OF})/k'$  необхідно визначити інтервал зміни кожного з керованих параметрів  $\Delta X_j$ .

Розглянемо ситуацію, коли в якості першого вихідного параметра використовується параметр шорсткості  $Ra$ , а в якості керованих параметрів – швидкість різання  $v$  і подача  $S_{об}$ , тобто  $k' = 2$ , то інтервали варіювання керованими параметрами розраховують за залежностями [25]:

$$\Delta V_{Ra} = \frac{Ra^{max} - Ra^{OF}}{2 \cdot \frac{dRa}{dV} \cdot k_3}, \quad (2.11)$$

$$\Delta S_{обRa} = \frac{Ra^{max} - Ra^{OF}}{2 \cdot \frac{dRa}{dS_{об}} \cdot k_3}, \quad (2.12)$$

Потім слід оцінити, яким чином зміна значень керованих параметрів відіб'ється на величині другого вихідного параметра  $Y_2$ ,

$$\Delta Y_2 = \frac{dY_2}{dX_1} \cdot \Delta X_{11} + \dots + \frac{dY_2}{dX_{k'}} \cdot \Delta X_{k'} \quad , \quad (2.13)$$

і порівняти  $\Delta Y_2$  з резервом цього параметра.

Якщо  $\Delta Y_2 < (Y_2^{max} - Y_2^{of})$ , то розраховуємо як зміниться вихідний параметр  $Y_3$ , використовуючи у відповідному математичному виразі інтервал варіювання  $\Delta X_{j1}$ .

Якщо  $\Delta Y_2 > (Y_2^{max} - Y_2^{of})$ , то необхідно визначити впливи, які приведуть до нуля резерв цього параметра:

$$\Delta X_{j2} = \frac{Y_2^{max} - Y_2^{of}}{k' \cdot \frac{dY_2}{dX_j}} \cdot k_2, \quad (2.14)$$

Якщо  $\Delta Y_2 = (Y_2^{max} - Y_2^{of})$ , то під час розрахунку  $Y_3$  можна використовувати і  $\Delta X_{j1}$ , і  $\Delta X_{j2}$ .

Можна обчислити вихідний параметр  $Y_0$  і його розрахунковий резерв, який зведеться до нуля при позитивних резервах інших вихідних параметрів. Застосовувані під час налагодження процесу керування впливи будуть визначені за залежністю:

$$\Delta X_{j0} = \frac{Y_0^{max} - Y_0^{of}}{k' \cdot \frac{dY_0}{dX_j}} \cdot k_3, \quad (2.15)$$

Розташування точок плану при зміні двох керованих параметрів ( $S_{об}$  і  $v$ ) показано на рис. 2.2. Перед початком обробки заготовок елементи режиму ( $S_{об}^0$  і  $v^0$ ) визначаються відповідно до нормативів, розраховуються або вибираються з каталогу інструменту. Після цього контролюються вихідні параметри.

Рисунок 2.2 – Розташування точок плану варіювання керуваними параметрами

Якщо прийняте рішення в процесі корекції режиму змінити подачу  $S_{об}$ , на плані варіювання отримаємо точку 1. Якщо фактичні значення вихідних параметрів у цій точці значно відрізняються від прогнозованих значень у бік збільшення, то обробка заготовок буде проводитися при подачі  $S_{об}^0$  і швидкості  $v^1$  (точка 2 на рис. 2.2). Якщо значення вихідних параметрів в точці 1 не перевищують прогнозованих значень, то обробка буде здійснюватися при подачі  $S_{об}^1$  і швидкості  $v^1$  (точка 3). Сторигований режим різання буде ближче до оптимального, ніж попередньо призначений.

Мінімальне значення інтервалу варіювання  $\Delta X_{Jmin}$  повинно бути таким, щоб очікуване значення вихідного параметра  $\Delta Y_i$  було не менше заданого довірчого інтервалу [26]. Різниця між середніми арифметичними значеннями будь-якого вихідного параметра вважається достовірною при виконанні умови:

$$\Delta Y_i \geq K_N \cdot \bar{W} / d_n, \quad (2.16)$$

де  $\Delta Y_i$  – інтервал зміни або різниця середніх арифметичних вихідного параметра  $Y_i$ ;  $K_N$  і  $d_n$  – коефіцієнти [27];  $\bar{W}$  – середній розмах варіювання по всіх сукупностях.

Враховуючи залежність (2.16):

$$\Delta Y_i = \frac{dY_0}{dX_j} \cdot \Delta X_j \geq K_N \cdot \bar{W} / d_n, \quad (2.17)$$

або

$$\Delta X_j = \frac{K_N \cdot \bar{W}}{d_n \cdot \frac{dY_0}{dX_j}}, \quad (2.18)$$

Залежність (2.18) визначає мінімальний інтервал зміни параметра, розрахованого за формулою (2.16). Якщо ця умова виконана, послідовність подальших дій така. Розраховуємо нове значення керованого параметра  $X_1^1$ :

$$X_1^1 = X_1^0 + \Delta X_1, \quad (2.19)$$

Після цього проводиться обробка заготовок при значеннях керованих параметрів  $X_1^1, X_2^0, \dots, X_{k'}^0$ . Потім на величину  $\Delta X_2$  змінюється параметр  $X_2$ :

$$X_2^1 = X_2^0 + \Delta X_2, \quad (2.20)$$

Аналогічно отримаємо значення параметрів  $X_1^1, X_2^1, \dots, X_{k'}^1$ . Розміщення точок плану варіювання від час двох керованих параметрів ( $X_1$  і  $X_2$ ) показано на рис. 2.3.

Рисунки 2.3 – Розташування точок плану при варіюванні двома керованими параметрами

Залежності для розрахунку похідних, аргументами яких є фактичні значення вихідних параметрів, матимуть такий вигляд:

$$\frac{dY_0}{dX_j} = \frac{Y_0^{l\Phi} - Y_0^{0\Phi}}{X_j^{l\Phi} - X_j^{0\Phi}}, \quad (2.21)$$

Якщо ж фактичні значення  $\frac{dY_0}{dX_j}$  виявляться більшими, ніж очікувані, ймовірно, що після варіювання  $j$  – м керованим фактором ( $j < k'$ ) запас (резерв) за параметром  $Y_0$  зменшиться настільки, що виявиться меншим за величину  $(Y_0^{max} - Y_0^{0\Phi})/k'$ .

Тому, якщо в точці  $j + 1$  керовані параметри приймуть значення  $X_1^1, X_2^1, \dots, X_j^1, X_{j+1}^1, \dots, X_{k'}^0$ , то є ймовірність отримання від'ємного резерву за параметром  $Y_0$ , тому обробку заготовок слід виконати за скоригованим планом при наступних значеннях керованих параметрів:

$$X_1^1, X_2^1, \dots, X_j^0, X_{j+1}^1, X_{j+2}^0, \dots, X_{k'}^0,$$

$$X_1^1, X_2^1, \dots, X_j^0, X_{j+1}^0, X_{j+2}^1, \dots, X_{k'}^0,$$

$$X_1^1, X_2^1, \dots, X_j^0, X_{j+1}^0, X_{j+2}^0, \dots, X_{k'}^0,$$

Параметр  $Y_0$ , який, імовірно, буде зведений до нуля при позитивних резервах інших вихідних параметрів, також визначається на основі розрахунків за вихідними рівняннями. Для запобігання виникненню браку по  $Y_{0\Phi}$ , необхідно щоб резерв після зміни  $j$ -го керованого параметра (де  $j = \dots k' - 1$ ) був більшим або дорівнював значенню  $(Y_0^{max} - Y_0^{o\Phi})/k'$ :

$$(Y_{0\Phi}^{max} - Y_{0\Phi}^{j\Phi}) \geq (Y_{0\Phi}^{max} - Y_{0\Phi}^{o\Phi})/k, \quad (2.22)$$

де  $Y_{0\Phi}^{max}$  – задане значення параметра  $Y_{0\Phi}$ ;  $Y_{0\Phi}^{j\Phi}, Y_{0\Phi}^{o\Phi}$  – значення цього ж параметра після варіювання  $j$ -им керованим параметром і після розрахунку режиму.

При невиконанні умови (2.22) рекомендується відмовитися від початкового плану і проводити експерименти зі зміненим планом, використовуючи керовані параметри з порядковим номером  $j + 1$  і вище, як було зазначено раніше.

Для того щоб виявити параметр  $Y_{0\Phi}$ , після варіювання параметром  $X_j$ , тобто в кожній точці плану, слід провести перевірки за всіма вихідними параметрами:

$$(Y_{i\Phi}^{max} - Y_{i\Phi}^{j\Phi}) \geq ((Y_{i\Phi}^{max} - Y_{i\Phi}^{o\Phi}) \cdot (k - j))/k, \quad (2.23)$$

Для внесення корекції в план експериментів необхідно перевірити, чи дотримуються умови для одного або декількох параметрів, описаних вище. Розташування точок скоригованого плану при двох керованих параметрах ( $X_1$  і  $X_2$ ) показано на рисунку 2.4.

Рисунок 2.4 – Розташування точок скоригованого плану при налагодженні процесу і варіюванні двома керованими параметрами

Коефіцієнти  $b_0, b_1, \dots, b_{k'}$  розраховують, використовуючи фактичні значення вихідних параметрів. Коефіцієнт  $b_0$  – це середнє арифметичне з значень вихідного параметра у всіх точках плану:

$$b_0 = \frac{Y^{0\phi} + Y^{1\phi} + \dots + Y^{k'\phi}}{1 + k'}, \quad (2.24)$$

де  $Y^{0\phi}, Y^{1\phi}, \dots, Y^{k'\phi}$  – фактичні (виміряні) значення вихідного параметра в точках 0, 1 ...  $k'$  відповідно.

Визначення коефіцієнтів  $b_1, b_2, \dots, b_{k'}$  можливе тільки в тому випадку, якщо план не зазнав коригувань і до триманні відповідні залежності:

$$b_1 = \frac{dY_i}{dX_1} = \frac{Y_i^{1\phi} - Y_i^{0\phi}}{X_1^1 - X_1^0}, \quad (2.25)$$

$$b_2 = \frac{dY_i}{dX_2} = \frac{Y_i^{2\phi} - Y_i^{1\phi}}{X_2^1 - X_2^0}, \quad (2.26)$$

$$b_{k'} = \frac{dY_i}{dX_{k'}} = \frac{Y_i^{k'\phi} - Y_i^{k'-1\phi}}{X_{k'}^1 - X_{k'}^0} \quad (2.27)$$

Після варіювання першим параметром і зміні плану доцільно використовувати залежності:

$$b_1 = \frac{dY_i}{dX_1} = \frac{Y_i^{1\phi} - Y_i^{0\phi}}{X_1^1 - X_1^0}, \quad (2.28)$$

$$b_1 = \frac{dY_i}{dX_2} = \frac{Y_i^{2\phi} - Y_i^{0\phi}}{X_2^1 - X_2^0}, \quad (2.29)$$

$$b_{k'} = \frac{dY_i}{dX_{k'}} = \frac{Y_i^{k'\phi} - Y_i^{0\phi}}{X_{k'}^1 - X_{k'}^0} \quad (2.30)$$

Після варіювання першим параметром і зміні плану доцільно використовувати залежності:

$$b_1 = \frac{dY_i}{dX_1} = \frac{Y_i^{l\phi} - Y_i^{0\phi}}{X_1^1 - X_1^0}, \quad (2.31)$$

$$b_2 = \frac{dY_i}{dX_2} = \frac{Y_i^{2\phi} - Y_i^{l\phi}}{X_2^1 - X_2^0}, \quad (2.32)$$

$$b_j = \frac{dY_i}{dX_j} = \frac{Y_i^{j\phi} - Y_i^{j-l\phi}}{X_j^1 - X_j^0}, \quad (2.33)$$

$$b_{j+1} = \frac{dY_i}{dX_{j+1}} = \frac{Y_i^{j+l\phi} - Y_i^{j-l\phi}}{X_{j+1}^1 - X_{j+1}^0}, \quad (2.34)$$

$$b_{k'} = \frac{dY_i}{dX_{k'}} = \frac{Y_i^{k'\phi} - Y_i^{j-l\phi}}{X_{k'}^1 - X_{k'}^0}. \quad (2.35)$$

Методика корекції, наведена в роботі [28], передбачає виконання меншого обсягу розрахунків. Однак, вона дозволяє врахувати вплив лише одного з керованих параметрів, який має найбільший вплив на контрольований параметр (шорсткість, похибка діаметрального розміру та ін.). Представлена вище методика корекції дозволяє врахувати вплив всіх керованих параметрів за допомогою розрахунку коефіцієнтів  $b_i$ . Аналогічну методику необхідно розробити і для випадку, коли частина резервів або всі зони є від'ємними.

### 2.3. Методика корекції режиму різання

Систематичні та випадкові фактори викликають зміну параметрів процесу обробки з плином часу. Для визначення цих параметрів у будь-який момент часу використовується методика розрахунку взаємопов'язаних вихідних і поточних показників процесу обробки, заснована на розробці алгоритму його функціонування. Однак, дана методика не дозволяє отримати в явному вигляді рівняння, яке пов'язує вихідні параметри процесу з часом роботи інструменту і

вихідними параметрами режиму обробки. Тому ми підбираємо залежності, що описують зміну розрахункового значення і-го вихідного параметра  $Y_{pi}$  в залежності від часу  $\tau$  [29]:

$$Y_{pi}(\tau) = A_{0pi} + A_{1pi} \tau + \dots + A_{Spi} \cdot \tau^S, \quad (2.36)$$

де  $A_{0pi}, \dots, A_{Spi}$  – коефіцієнти;  $\tau$  – час.

Полін першого ступеня має вигляд:

$$Y_{pi}(\tau) = A_{0pi} + A_{1pi} \cdot \tau. \quad (2.37)$$

Якщо в момент часу  $\tau = \tau_c$  при призначених режимах  $X_j^{Op}$  значення хоча б одного розрахункового значення вихідного параметра перевищує задане значення цього параметра  $Y_i^{max}$ , то слід скоригувати режим обробки (рис. 2.5, а). Режим обробки може бути інтенсифікацій, якщо розрахункові величини вихідних параметрів не досягають заданих значень (рис. 2.5, б). Вплинути на вихідні параметри можливо за рахунок зміни вхідних

Рисунок 2.5 – Графік залежності розрахункового значення вихідного параметра процесу від часу а – розрахункове значення вихідного параметра перевищує задане (регламентоване); б – розрахункове значення вихідного параметра не перевищує задане (регламентоване)

Розрахуємо інтервал варіювання керованими параметрами, що дозволяють змінити вихідні параметри в момент  $\tau_c$  на величину  $\Delta Y_{pi}$  (див. рис. 2.5):

$$\Delta Y_{pi} = Y_{pi}^{\tau_c} - Y_i^{max}, \quad (2.38)$$

де  $Y_{pi}^{\tau_c}$  – розрахункове значення вихідного параметра в момент часу  $\tau_c$ .

Розрахуємо інтервали варіювання керованими параметрами:

$$\Delta X_{ji} = \frac{\Delta Y_{pi}}{k' \cdot \frac{dY_{pi}}{dX_j} \cdot k_3}, \quad (2.39)$$

де  $k'$  – коефіцієнт, що дорівнює кількості керованих параметрів;  $k_3$  – коефіцієнт запасу (рекомендоване значення при варіюванні одним керованим параметром – 1,8; при варіюванні двома керованими параметрами – 2,0);  $\Delta Y_{pi}$  – значення, на яке слід змінити  $i$ -й вихідний параметр;  $X_j$  – значення  $j$ -го керованого параметра.

Розраховуючи похідні  $dY_{pi}/dX_j$ , використовуємо аналітичні залежності, що дозволяють обчислити вихідні параметри в певний момент часу. Потім слід оцінити, яким чином зміна керуючих параметрів (швидкості різання  $v$ , подачі  $b_{oc}$  та ін.) відіб'ється на величинах інших контрольованих вихідних параметрів:

$$\Delta Y_2 = \frac{dY_2}{dX_1} \cdot \Delta X_{11} + \dots + \frac{dY_2}{dX_k} \cdot \Delta X_{k1}, \quad (2.40)$$

і порівняти  $\Delta Y_2$  із запасом даного параметра.

Якщо  $\Delta Y_2 > (Y_2^{max} - Y_2^{of})$ , то визначити зміну вихідного параметра застосувавши у відповідній математичній моделі значення  $\Delta X_{ji}$ :

$$\Delta Y_3 = \frac{dY_3}{dX_1} \cdot \Delta X_{11} + \dots + \frac{dY_3}{dX_k} \cdot \Delta X_{k1}. \quad (2.41)$$

Якщо  $\Delta Y_2 < (Y_2^{max} - Y_2^{of})$ , то то слід інтервали зміни керованих параметрів, які зводять до нуля резерв другого параметра:

$$\Delta X_{j2} = \frac{Y_2^{max} - Y_2^{of}}{k \cdot k_3 \cdot \frac{dY_2}{dX_j}}. \quad (2.42)$$

А при визначенні  $Y_3$  використовувати значення  $\Delta X_{j2}$ , тобто:

$$\Delta Y_3 = \frac{dY_3}{dX_1} \cdot \Delta X_{12} + \dots + \frac{dY_3}{dX_{k'}} \cdot \Delta X_{k2}. \quad (2.43)$$

Якщо  $\Delta Y_2 = (Y_2^{max} - Y_2^{of})$ , то при визначенні  $\Delta Y_3$  можна використовувати  $\Delta X_{j1}$  і  $\Delta X_{j2}$ . Шляхом проведення аналогічних дій з різними параметрами, можливо виявити вихідний параметр  $Y_0$ , резерв якого буде зведений або наближений до нуля, в той час як інші параметри будуть мати позитивні значення резервів. Моделюючи процес, керовані параметри змінюються і розраховують значення даних керованих параметрів  $X_j^{1p}$ :

$$X_j^{1p} = X_j^{0p} + \Delta X_j, \quad (2.44)$$

де  $X_j^{0p}$  – початкові значення керованих параметрів, отримані після розрахунку або призначення режиму обробки.

Параметр  $\Delta A_{lpij}$  характеризує зміну інтенсивності зміни  $i$ -го вихідного параметра від часу при зміні всіх вхідних параметрів. Відносна зміна цього коефіцієнта залежно від інтервалу варіювання  $j$ -м керованим параметром:

$$\Delta A_{lpij} = \frac{A_{lpi} - A_{lpi}^1}{X_j^{0p} - X_j^{1p}}, \quad (2.45)$$

де  $A_{lpi}^1$  – значення коефіцієнта при варіюванні  $j$ -м керованим параметром при вхідних параметрах  $X_j^{1p}, X_j^{0p}, X_j^{1p}$ .

Виявлення функцій, що описують зміну в часі параметрів механічної обробки, досягається за допомогою методики статистичного аналізу. Ця методика дозволяє визначити середні арифметичні значення параметрів процесу та їх зміну в часі. У початковий момент часу  $\tau_0$  фактичне значення  $i$ -го параметра відповідає коефіцієнту  $A_{0fi}$ , а фактична швидкість зміни  $i$ -го параметра в часі характеризується коефіцієнтом  $A_{1fi}$ . Внаслідок можливої некоректності математичних моделей процесу в більшості випадків крива зміни фактичних значень вихідних параметрів буде відрізнятися від розрахункової (рис. 2.6).

Рисунок 2.6 – Графіки залежності розрахункового та фактичного значень вихідного параметра процесу від часу: а – фактичне значення вихідного параметра перевищує задане (регламентоване) в момент часу; б – фактичне значення вихідного параметра не досягає заданого (регламентованого) в момент часу.

Під час корекції режиму значення його елементів змінюються незначно, що спричиняє незначні зміни фактичних значень коефіцієнта  $A_{1\phi i}$ . Тому значення  $i$ -го вихідного параметра (коефіцієнта  $A_{0\phi i}^1$ ) у момент часу  $\tau_0$  слід визначити (рис. 2.7):

Рисунок 2.7 – Графіки залежності фактичного значення вихідного параметра від часу для корекції режиму в початковий момент часу

Якщо період стійкості інструменту є значним, то доцільно розпочати процедуру корекції після напрацювання інструменту протягом часу  $\tau_{pl}$  ( $l = 1, 2, \dots, q$ ) меншого періоду стійкості інструменту. Екстраполяція кризих, що характеризують зміну за час  $0, \dots, \tau_{pl}$  фактичних значень вихідних параметрів, свідчить, що після обробки партії заготовок різниця між розрахунковим і фактичним значеннями вихідного параметра складе величину  $\Delta y_{\phi i}$  (рис. 2.8).

Рисунок 2.8 – Графік залежності фактичного значення вихідного параметра від часу при корекції режиму після напрацювання інструменту в момент часу, менший періоду стійкості

Фактичне значення коефіцієнта  $A_{1\phi i}$  можна розрахувати за формулою:

$$A_{1\phi i} = \frac{Y_{\phi i}^{\tau_{p1}} - A_{0\phi i}}{\tau_{p1}}, \quad (2.46)$$

де  $Y_{\phi i}^{\tau_{p1}}$  – фактичне значення  $i$ -го вихідного параметра в момент часу

Розрахувати значення  $i$ -го вихідного параметра в момент часу  $\tau_{p1}$  можна за залежністю:

$$A_{p1\phi i}^1 = Y_i^{max} - A_{1\phi i} \cdot (\tau_c - \tau_{p1}). \quad (2.47)$$

Необхідний результат може бути не досягнутий в момент часу  $\tau_{p1}$ , оскільки при першій корекції режиму використовуються похідні, отримані диференціюванням математичних залежностей. Можна прогнозувати в момент часу  $\tau_{p2}$ , що фактичні значення вихідних параметрів в момент  $\tau_c$  будуть відрізнятись від розрахункових значень на величину  $\Delta Y_{\phi i}^1$  (див. рис. 2.8).

Для визначення величин керуючих впливів необхідно попередньо визначити пріоритетний вихідний параметр і відносні значення, на основі яких вони розраховуються. Потім слід оцінити, яким чином зміна керуючих параметрів (швидкість різання  $v$ , подача  $S_{об}$  та ін.) відіб'ється на величинах другого і наступних контрольованих вихідних параметрів.

## Висновки до розділу 2

1. Представлено методику визначення взаємопов'язаних поточних показників, вихідних і вхідних параметрів процесу обробки.
2. Розроблено методику корекції режиму механічної обробки в умовах невизначеності технологічної інформації, що передбачає варіювання керованими параметрами за певним планом з метою наближення їх значень до оптимального рівня та підлаштування (корекцію) моделей, що пов'язують вихідні та вхідні параметри процесу обробки.
3. Розроблено методику корекції режиму в умовах невизначеності інформації з урахуванням параметрів процесу, що змінюються в часі.

## РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1 Розробка математичних моделей для розрахунку температур

Якість обробки та продуктивність залежать від температури, яка впливає на знос і міцність інструменту, а також на робочі поверхні ріжучого інструменту і поверхневий шар заготовки. Для розрахунку вихідних параметрів процесу точіння (похибка діаметрального розміру, шорсткість) також необхідні відомості про температурне поле. Сумарна потужність тепловиділення при точінні:

$$W = W_g + W_{1T} + W_{2T}, \quad (3.1)$$

де  $W_g$ ,  $W_{1T}$ ,  $W_{2T}$  – потужності джерел тепловиділення, що виникають як результат переходу в теплоту роботи деформації  $W_g$ , роботи сил тертя на передній  $W_{1T}$  і задній  $W_{2T}$  поверхнях ріжучого клина, Вт.

Потужності джерел тепловиділення можна визначити:

$$W_{1T} = F_1 \cdot v_1 \quad (3.2)$$

$$W_{2T} = F_2 \cdot v_2, \quad (3.3)$$

$$W_g = P_Z \cdot v - (W_{1T} + W_{2T}), \quad (3.4)$$

де  $F_1, F_2$  – сили тертя в зонах контакту різця зі стружкою і заготовкою відповідно, Н;  $v$  – швидкість різання, м/с;  $v_1$  – швидкість переміщення стружки відносно передньої поверхні інструменту, м/с;  $P_Z$  – тангенціальна складова сили різання, Н.

Густина джерела тепловиділення, що впливає на площину зсуву  $q_g$ , вважається рівномірно розподіленою, виходячи з проведених досліджень. У зоні контакту передньої поверхні різця зі стружкою щільність джерела тепловиділення  $q_{1T}$  розподілена відповідно до комбінованого закону, а щільність джерела тепловиділення, що діє в зоні контакту задньої поверхні різця із заготовкою  $q_{2T}$ , – за несиметричним нормальним законом. Приймаємо припущення, що матеріали заготовки і різця ізотропні.

Розрахунок тангенціальної складової сили різання виконаємо за залежністю:

$$P_z = 1,155 \cdot \sigma_{St} \cdot u \cdot S_{06} \cdot t_r \cdot \left\{ \left[ 1 + \mu_1 \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2k_c} \right] \cdot \cos\gamma + \frac{k_c}{4u \cdot \cos\gamma} + \mu \cdot \sin\gamma + \frac{\mu_2 \cdot l_2}{u \cdot S_{06} \cdot \sin\phi} + \frac{k_c \cdot S_{06} \cdot \sin^2\phi}{4u \cdot t_r \cdot \cos\gamma} \right\}. \quad (3.5)$$

Вважаємо, що джерело  $q_g$  розподілений рівномірно:

$$q_g = \frac{W_g \cdot \sin\phi}{t_r \cdot S_{06}}, \quad (3.6)$$

де  $\phi$  – кут зсуву, град.

$$\sin\phi = \frac{\cos\phi}{\sqrt{k_c^2 - 2k_c \cdot \sin\gamma + 1}} \quad (3.7)$$

Густина джерела тепловиділення  $q_{1T}$ :

$$q_{1T} = \frac{3 \cdot W_{1T} \cdot \sin\phi}{2 \cdot t_r \cdot l_1}, \quad (3.8)$$

де  $l_1$  – довжина контакту стружки з передньою поверхнею різця:

$$l_1 = t_r \cdot k_c^{0,1} \cdot [k_c \cdot (1 - tg\gamma) + sec\gamma]. \quad (3.9)$$

Густина джерела тепловиділення  $q_{2T}$ :

$$q_{2T} = \frac{2 \cdot W_{2T} \cdot \sqrt{k_0} \cdot \sin\phi}{t_r \cdot \sqrt{\pi} \cdot erf[l_2 \cdot \sqrt{k_0}]}, \quad (3.10)$$

де  $k_0 = \frac{3}{2}$  – коефіцієнт;  $erf$  – інтеграл ймовірності

$$erf[l_2 \cdot \sqrt{k_0}] = \sqrt{1 - \exp\left[-1,26 \cdot (l_2 \cdot \sqrt{k_0})^2\right]} \quad (3.11)$$

Розподіл температури у внутрішніх точках об'єктів теплообміну, таких як заготовка, РІ та стружка, описується диференціальним рівнянням теплопровідності, нестационарного тривимірного температурного поля в декартовій системі, яке для координат можна записати у вигляді:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\delta}{\delta x} \left( \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left( \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left( \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3.12)$$

де  $\rho$  – густина матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – питомі теплоємність матеріалу, Дж/(кг · К);  $\tau$  – час, с.

Вважаємо, що в початковий момент часу температура будь-якої точки заготовки, ріжучої пластини і корпусу різця дорівнює температурі навколишнього середовища  $T_0$ :

$$T(x, y, 0) = T_0 \quad (3.13)$$

Вважаємо, що термічний опір зони контакту ріжучої пластини і корпусу різця мізерно малий, тому температури сполучуваних поверхонь ріжучої пластини  $T_{\text{СМП}}$  і корпусу інструменту  $T_{\text{кор}}$  однакові:

$$T_{\text{СМП}} = T_{\text{кор}} \quad (3.14)$$

СОЖ вступає в контакт з поверхнями, нагрітими заготовкою, стружкою і різцем. Залежно від температури цих поверхонь, відбувається конвективний теплообмін. Температурне поле розраховується на основі різницевої сітки, що охоплюють контактуючі об'єкти. Різницева сітка контактуючих об'єктів температурного поля, представлені на рис. 3.1.

Рисунок 3.1 – Різницева сітка об'єктів теплообміну при точінні: 1 – заготовка; 2 – ріжуча пластина; 3 – стружка; 4 – корпус різця

Заготовку вважаємо нерухомою 1, а ріжуча пластина 2, корпус різця 4, стружка 3 і площина зсуву DE переміщуються відносно заготовки зі швидкістю  $u$ . Система координат  $XOY$  пов'язана з ріжучою пластиною 2 і вона переміщається відносно заготовки в напрямку осі  $OX$  зі швидкістю  $u$ .

Складним завданням є розв'язання рівнянь теплопровідності разом з граничними умовами з урахуванням переміщення контактуючих об'єктів, залежності теплофізичних властивостей і межі плинності матеріалу заготовки від температури, і аналітичними методами вирішити її неможливо. Для вирішення цієї

проблеми було застосовано чисельний метод кінцевих елементів (МКЕ). Методика розрахунку температур реалізована в оригінальних програмах.

Температура, зафіксована в певний момент часу, використовується для розрахунку теплофізичних характеристик об'єктів і механічних властивостей матеріалу заготовки в наступний момент. При розрахунку інтенсивності нормальних і тангенціальних напружень на площині зсуву враховується температура деформованого шару матеріалу заготовки. Фіксували температури в точках, розташованих на майданчиках контакту передньої поверхні ріжучої пластини з утвореною стружкою і задньої поверхні пластини із заготовкою, а також у заготовці на різній відстані від оброблюваної поверхні.

### 3.2 Статистичний аналіз параметрів процесу механічної обробки

Методика статистичного аналізу фактичних значень вихідних параметрів базується на поділі величини (поля) розсіювання параметрів на систематичну та випадкову складові. Для виділення цих складових параметрів використано дисперсійний метод.

Знаючи функції зміни середнього арифметичного значення  $Y(\tau)$  і меж миттєвого розсіювання параметрів  $\omega_y$  (верхню  $Y_B(\tau)$  і нижню  $Y_H(\tau)$  межі миттєвих полів розсіювання) з часом (рис. 3.2), можна розрахувати фактичний час підналадки.

Рисунок 3.2 – Графік для визначення часу підналадки або періоду стійкості інструменту

Час підналадки  $\tau_{\Pi}$  (період стійкості  $\tau_c$ ) дорівнює меншому з розрахованих значень  $\tau_B$  і  $\tau_H$ :

$$\tau_{\Pi}(\tau_c) = \min(\tau_B; \tau_H) \quad (3.15)$$

де  $\tau_B$  і  $\tau_H$  можна розрахувати:

$$Y_i^{max} = \bar{Y}(\tau) + \omega_y(\tau)/2 \quad (3.16)$$

$$Y_i^{min} = \bar{Y}(\tau) - \omega_y(\tau)/2 \quad (3.17)$$

де  $Y_i^{max}$  і  $Y_i^{min}$  – найбільше і найменше граничне значення вихідного параметра.

Нижче наведено послідовність статистичного аналізу параметрів технологічного процесу.

1. Перевіряють гіпотезу про нормальний розподіл поля миттєвого розсіювання параметра, використовуючи критерій Пірсона.

2. Розраховують середнє значення параметра вихідного параметра та дисперсію на  $i$ -му інтервалі роботи інструменту.

3. Визначають середнє значення  $\bar{Y}$  всієї сукупності параметрів  $Y_i$  і дисперсію сумарного поля розсіювання параметра.

4. Розраховують дисперсію, викликану зміною функції середнього значення параметра  $\bar{Y}(\tau)$ .

5. Визначають середнє значення середніх квадратичних відхилень та дисперсію, спричинену зміною в часі функції середнього квадратичного відхилення.

6. Підбирають емпіричні залежності, що описують зміну середніх значень параметрів  $Y_i$ , верхньої та нижньої меж миттєвого поля розсіювання з часом.

7. Розраховують координати верхньої та нижньої меж миттєвих полів розсіювання для різних інтервалів часу.

8. Підбирають емпіричні залежності, що описують зміни параметрів  $Y_{B_i}$  та  $Y_{H_i}$  з часом.

9. За залежністю (3.15) розраховується час підналадки і/або період стійкості інструменту.

### Висновки до розділу 3

1. Вибрано контрольовані вихідні та керувані параметри процесу токарної обробки. Отримано комплекс математичних залежностей, що дозволяють розрахувати вихідні параметри: виробничу похибку діаметральних розмірів деталей, оброблених точінням; шорсткість обробленої поверхні за параметром  $Ra$ . Отримано залежності для розрахунку розсіювання параметра  $Ra$ .

2. Розроблено методик розрахунку температур різання. Дана методика дозволяє врахувати виділення теплоти в області стружкоутворення і на поверхнях контакту різця із заготовкою і стружкою, взаємне переміщення контактуючих об'єктів (заготовки і стружки щодо різця), залежність теплофізичних характеристик матеріалів контактуючих об'єктів (ріжучої частини інструменту і заготовки) і механічних властивостей матеріалу заготовки від температури.

3. Розроблено алгоритми для розрахунку функцій, що характеризують зміну в часі середніх арифметичних значень і меж миттєвих полів розсіювання фактичних значень вихідних параметрів і поточних показників процесу точіння.

## РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ

### 4.1 Методика експериментальних досліджень

Якість оброблених поверхонь деталі визначається сукупністю показників: фізико-механічним станом поверхневого шару, мікроструктурою металу, шорсткістю і точністю обробки. В якості показників ефективності процесу гочіння обрані наступні параметри. У більшості випадків конструктор вказує на кресленні вимоги до шорсткості поверхні, використовуючи середньоарифметичне відхилення профілю  $Ra$ . Тому для оцінки шорсткості обробленої поверхні будемо використовувати показник  $Ra$ , мкм.

Для вимірювання діаметральних розмірів зразків слід вибрати такий вимірювальний інструмент або прилад, похибка вимірювання якого не перевищує допустиму для даного діаметра і допускає похибку  $\delta$ . При цьому діапазон вимірювання приладу повинен дозволити виконати вимірювання заданого діаметра, а діапазон показань – відрахувати будь-яке відхилення розміру в межах його допуску. Обрані засоби вимірювання наведені в табл. 4.1, а їх метрологічні характеристики – в табл. 4.2.

Таблиця 4.1 – Характеристика контрольованих розмірів

Номинальний розмір і умовне позначення поля допуску розміру	Допуск розміру $Td$ , мкм.	Гранична допустима похибка вимірювання мкм.	Засіб вимірювання
$\emptyset 34h8$	39	10	Мікрометр гладкий МК 25-1 ГОСТ 6507-90
$\emptyset 48h10$	100	20	Мікрометр гладкий МК 50-1 ГОСТ 6507-90

Ø78h8	46	12	Мікрометр гладкий МК 100-1 ГОСТ 5507-90
Ø78h10	120	30	

Таблиця 4.2 – Метрологічна характеристика засобів вимірювання

Найменування	Діапазон вимірювань, мм	Діапазон показань, мм	Ціна поділки, мм	Гранична похибка вимірювання, мм
МК 25-1	0-25	0,5	0,01	±0,0025
МК 50-1	25-50	0,5	0,01	±0,0025
МК 100-1	75-100	0,5	0,01	±0,0025

Обрані засоби вимірювання за своїми метрологічними характеристиками відповідають вимогам, необхідним для вимірювання розмірів валів.

Умови та порядок проведення експериментів:

1. Верстат токарний з ЧПУ CTX310 Ecoline.
2. Ріжучий інструмент – різець DDJN 2020, ріжуча пластинка (СМП) - 110408-MPNC3225 (Kennametal); різець MSDNN 2020K12 з СМП 120408 T15K6; різець MSDNN 2020K12 з СМП 120404 IS7015 (InTool).

3. В якості матеріалів зразків були обрані конструкційна вуглецева сталь марки Сталь 45 і легована корозійно-стійка сталь марки 12X18H10T, що відносяться до різних груп оброблюваності. Хімічний склад і фізико-механічні властивості обраних матеріалів наведені в табл. 4.3, 4.4.

Таблиця 4.3 – Хімічний склад матеріалу заготовки (ГОСТ 5632-72), % (маси)

Марка сталі	C	Si	Mn	Cr	Ni
Сталь 45 (ГОСТ 1050-38)	0,42...0,50	0,17...0,37	0,50...0,80	Не более 0,25	-

12X18H10T (ГОСТ 5632-72)	Не більше 0,12	Не більше 0,8	Не більше 2,9	17...19	9...11
-----------------------------	-------------------	------------------	------------------	---------	--------

Таблиця 4.4 – Фізико-механічні властивості матеріалу заготовки

Марка сталі	Межа міцності $\sigma_b$ , МПа	Межа текучості $\sigma_s$ , МПа	Модуль пружності E, МПа
Сталь 45 (ГОСТ 1050-88)	600	355	210000
12X18H10T (ГОСТ 5632-77)	510	196	205000

Ескіз заготовок для експериментального дослідження представлений на рис. 4.1. Розміри зразків наведені в табл. 4.5.

Рисунок 4.1 – Ескіз заготовки

Таблиця 4.5 – Розміри зразків

Матеріал зразка	Діаметр $d$ , мм	Довжина $l_{\text{заг}}$ , мм	Відношення $l_{\text{заг}}/d$
Сталь 45 (ГОСТ 1050-88)	80	200	2,5
12X18H10T (ГОСТ 5632-72)	50	120	2,4
12X18H10T (ГОСТ 5632-72)	35	120	3,4

Режим різання та необхідне значення вихідних параметрів наведені в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Умови проведення експериментальних досліджень

Марка сталі	Марка інструментального матеріалу	Швидкість різання м/хв	Подача на оборот мм/об	Глибина різання, мм	Граничне значення параметра $Ra$ , мкм	Квалітет обробки	Граничне значення похибки діаметрального розміру $\omega$ , мм
12X18H10T (ГОСТ 5632-72)	IS7015 (ф. InTool, КНР)	250	0,036	0,5	1,6	8	0,039
Сталь 45 (ГОСТ 1050-88)	NC3225 (ф. Korloy, республіка Корея)	200	0,1	1	1,6	8	0,046
Сталь 45 (ГОСТ 1050-88)	T15K6 (ГОСТ 3882-74)	121	0,030	1	3,2	10	0,120
12X18H10T (ГОСТ 5632-72)	T15K6 (ГОСТ 3882-74)	142	0,11	1	3,2	10	0,10

#### 4.2 Дослідження ефективності методики корекції режиму точіння при малому напрацюванні інструменту

У даному пункті наведені результати досліджень при перевірці працездатності корекції режиму точіння, призначеного в умовах невизначеності технологічної інформації, при малому напрацюванні інструменту, коли впливом зносу на параметри процесу можна знехтувати.

Матеріал зразків – Сталь 45, ГОСТ 1050-88. Ріжучий інструмент – різець DJNL 2020, ріжуча пластина (СМП) – DNMG110408-MPNC3225 (Korloy) із зносостійким покриттям: головний кут у плані  $\varphi = 93^\circ$ ; допоміжний кут у плані  $\varphi_1 = 32^\circ$ ; задній кут  $\alpha = 5^\circ$ ; передній кут  $\gamma = -6^\circ$ . Необхідне значення шорсткості  $Ra = 1,6$  мкм; точність діаметрального розміру по 8 квалітету –  $\varnothing/8/8$  мм. Призначаємо режим за каталогом різального інструменту «Korloy». Оскільки в каталогах ріжучого інструменту не згадується точність і шорсткість

обробленої поверхні, а значення елементів режиму різання задані діапазоном значень, то приймаємо з діапазону значень швидкості, близьку до максимально допустимої  $v = 200\text{м/хв}$  і мінімально допустиму подачу  $S_{об} = 0,10\text{ мм/об}$ , глибину різання приймаємо  $t_r = 1\text{ мм}$ . Виконуємо обробку на призначеному режимі. Результати вимірювань вихідних параметрів наведені в табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Результати експерименту при режимі, призначеному за каталогом

№ заготовки	Фактичне значення діаметра валу $d_{\phi}$ , мм	Фактичне значення шорсткості $Ra_{\phi}^0$ , мкм
1	77,97	1,08
2	77,98	0,956
3	77,97	1,01
4	77,99	0,905

Як видно з табл. 4.7, отримано позитивні резерви (запаси) за обома вихідними параметрами ( $d_{\phi}$  і  $\omega$ ). Приймаємо рішення варіювати швидкістю різання  $v$  і подачею  $S_{об}$ . Скориговані значення швидкості різання і подачі визначаємо за програмою «Корекція режиму точіння». Таким чином, отримано скоригований режим:  $v = 199\text{м/хв}$ ;  $S_{об} = 0,159\text{ мм/об}$ . На даному режимі провели обробку заготовок – результати в табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – Результати експерименту (при скоригованому режимі)

№ заготовки	Фактичне значення діаметру валу $d_{\phi}$ , мм	Фактичне значення шорсткості $Ra_{\phi}^1$ , мкм
1	77,96	1,18
2	77,99	1,13
3	77,97	1,27
4	77,98	1.43

Скоригований режим значно ближче до оптимального рівня. У порівнянні з режимом, призначеним за каталогом ріжучого інструменту, подача збільшилася на 59%, швидкість різання незначно знизилася (на 0,5%). Це призводить до збільшення продуктивності обробки в 1,58 рази в порівнянні з обробкою на режимі, призначеному за каталогом ріжучого інструменту, із збереженням заданої (необхідної) якості обробки. Проведемо експеримент з метою корекції режиму, призначеного на основі розрахунку за формулами теорії різання.

Таблиця 4.9 – Результати експерименту на скоригованому режимі

№ заготовки	Розмір оброблених деталей	Фактичне значення шорсткості
	$d_{\phi}$ , мм	$Ra_{\phi}^{\phi}$ , мкм
1	77,95	1,40
2	77,96	1,33
3	77,98	1,31
4	77,96	1,64

Різниця між граничним (заданим) значенням шорсткості і фактичним складає 2...10%; за параметром  $\omega$  зафіксовано позитивний запас. Приймаємо рішення подальшу корекцію не проводити.

У порівнянні з розрахованим режимом обробки, подача збільшилася в 2,92 рази, що дозволяє збільшити продуктивність обробки в 2,92 рази при забезпеченні заданої (необхідної) якості оброблених деталей.

#### **4.3 Дослідження ефективності методики корекції режиму точіння, що враховує залежність параметрів обробки від часу**

Дослідження ефективності функціонування розробленої методики проводиться в такій послідовності:

*1-й етап (розрахунковий).*

При остаточному (чистовому) точінні може бути забезпечений 7...11 квалітет діаметральних розмірів і шорсткість обробленої поверхні за параметром  $Ra$  – 1,6...6,3 мкм. Приймаємо необхідне (граничне) значення шорсткості  $Ra =$

3,2 мкм; точність розміру по 10 квалітету –  $\varnothing 48h_{10}$  мм. Отже, допуск діаметрального розміру – 0,1 мм. Період стійкості  $\tau_c$  різця при одноінструментальній обробці становить 30 ... 60 хв. Приймаємо значення періоду стійкості  $\tau_c = 30$  хв.

Попередньо провели розрахунок режиму точіння заготовки зі сталі 12X18H10T ГОСТ 5632-72 за формулами теорії різання:  $\tau_r = 1$  мм;  $S_{об} = 0,11$  мм/об;  $v = 146$  м/хв. Різучий інструмент – різець MSDNN 2020 K12, ріжуча пластина (СМП) – 120408 T15K6: головний і допоміжний кути в плані  $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$ ; задній кут  $\alpha = 6^\circ$ ; передній кут  $\gamma = -6^\circ$ .

Графіки залежності розрахункових значень вихідних параметрів від збільшення часу напрацювання отримані за допомогою програми «Корекція режиму точіння в умовах невизначеності технологічної інформації» (рис. 4.2).

Рисунок 4.2 – Графіки залежності розрахункових значень вихідних параметрів від часу при  $S_{об} = 0,11$  мм/об;  $v = 146$  м/хв

Оскільки розрахункове значення діаметра циліндричної шийки в момент часу 30 хв перевищує задане значення, необхідно виконати корекцію режиму. Розрахунок параметрів процесу обробки показав, що подача  $S_{об}$  має незначний вплив на величину похибки діаметрального розміру, тому приймаємо рішення варіювати швидкість різання  $v$ .

Рисунок 4.3 – Графіки залежності розрахункових значень вихідних параметрів від часу  $t$  при скоригованому режимі  $S_{06} = 0,11$  мм/об;  $v = 143$  м/хв.

Оскільки математичне очікування діаметрального розміру в момент часу 30 хв дещо перевищує задане значення, то потрібна повторна корекція режиму. При розрахунку значень величин корекції враджуємо лише швидкістю різання, яка, згідно з розрахунком, повинна прийняти значення:  $v = 142$  м/хв. Графіки залежності розрахункових значень вихідних параметрів від часу  $t$  при повторно скоригованому режимі представлені на рис. 4.4.

Рисунок 4.4 – Графіки залежності розрахункових значень вихідних параметрів від часу  $t$  при повторно скоригованому режимі:  $S_{06} = 0,11$  мм/об;  $v = 142$  м/хв

*2-й етап (експериментальний)*

Результати вимірювань вихідних параметрів заготовок на скоригованому режимі наведені в табл. 4.10.

Таблиця 4.10 – Результати вимірювань: матеріал заготовки – сталь 12Х18Н10Т, інструментальний матеріал – Т15К6,  $\tau_r = 1$  мм;  $S_{об} = 0,11$  мм/об;  $v = 142$  м/хв

№ заготовки	Момент часу $t_i$ , хв	Розмір опрацьованих деталей $d_\phi$ , мм	Фактичне значення шорсткості $Ra_\phi^0$ , мкм
1	0,70	47,91	1,35
2	1,41	47,91	1,47
3	2,11	47,92	1,76
4	2,82	47,91	1,90
5	3,52	47,96	1,99
6	4,22	47,91	1,92
7	4,93	47,94	1,73
8	5,63	47,92	1,79

Вимірювання шорсткості за діаметра вихідних параметрів проводилися на обмеженому часовому інтервалі, що становив 0... 5,63 хв. (менше, ніж період стійкості). Потім отримані криві екстраполювалися на час, рівний періоду стійкості різця (див. рис. 4.5 а, б).

а)

Рисунок 4.5 – Кризі змін розрахункових і фактичних значень вихідних параметрів від часу  $t$  при режимі  $S_{об} = 3,11$  мм/об;  $v = 142$  м/хв: а, б, в – перша; друга і третя партія зразків; 1 – крива змін фактичних значень вихідних параметрів; 2 – крива зміни розрахункових значень вихідних параметрів; 3 – задані значення вихідних параметрів

Результати експериментів піддали статистичному аналізу. Статистичний аналіз результатів показав, що середні величини у всіх трьох партіях можна прийняти рівними. Корекцію режиму розраховано за даними 1-ї партії заготовок.

*3-й етап (експериментальний).*

Розрахунок нових значень керованих параметрів проводимо за програмою. Потім здійснюється обробка на скоригованому режимі:  $S_{об} = 0,168$  мм/об;  $v = 140$  м/хв. Результати вимірювань вихідних параметрів наведені в табл. 4.11.

Таблиця 4.11 – Результати вимірювань 1-ї партії: матеріал заготовки - сталь 12Х18Н10Т, інструментальний матеріал – Т15К6,  $\tau_c = 1$  мм;  $S_{об} = 0,168$  мм/об;  $v = 140$  м/хв

№ заготовки	Момент часу, $\tau_i$ , хв	Розмір опрацьованих деталей, $d_{ф}$ , мм	Фактичне значення шорсткості, $Ra_{\phi}^0$ , мкм
1	8,92	47,92	2,11
2	12,22	47,93	2,37
3	15,52	47,93	2,33
4	18,81	47,94	2,55
5	22,11	47,92	2,46
6	25,41	47,94	2,61
7	28,70	47,93	2,69
8	32,00	47,94	2,84

Вихідні параметри (шорсткість  $Ra$  і діаметр  $d$ ) виміряні на інтервалі часу, рівному періоду стійкості різця (рис. 4.5).

Рисунок 4.6 – Криві змін розрахункових і фактичних значень вихідних параметрів від часу  $t$  при режимі  $S_{об} = 0,168$  мм/об;  $v = 140$  м/хв: а, б, в – перша; друга і третя партія зразків; 1 – крива змін фактичних значень вихідних параметрів; 2 – крива зміни розрахункових значень вихідних параметрів; 3 – задані значення вихідних параметрів

У порівнянні з розрахунком застосування скоригованого режиму дозволяє збільшити продуктивність обробки на 34%. Протягом заданого періоду стійкості  $\tau_s = 30$  хв забезпечується необхідна якість обробки (за параметром шорсткості  $Ra$  і точністю діаметрального розміру деталі). Корекція режиму дозволила підвищити продуктивність обробки партій зразків з 12X18H10T ріжучою пластиною зі сплаву IS7015 (ф. InTool) із зносостійким покриттям  $TiAlN$  на 33% порівняно з

призначеним режимом. Протягом тимчасового інтервалу 30 хв забезпечується досягнення необхідної якості обробки за параметрами шорсткості і точності діаметрального розміру деталі.

#### **Висновки до розділу 4**

1. Розроблено алгоритми для корекції режиму точіння, які дозволяють визначити режим обробки з урахуванням зміни параметрів процесу в часі.

2. Проведено дослідження ефективності розробленої методики для корекції режиму точіння в лабораторних умовах. Корекція режиму різання дозволила забезпечити збільшення продуктивності обробки на 25 ...30 % без урахування і на 30...35% з урахуванням змінних у часі параметрів процесу обробки при забезпеченні необхідної якості деталей при обробці жорстких валів (відношення  $l_{заг}/d$  не перевищує 4) і консольному закріпленні заготовки.

## РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

### 5.1 Охорона праці

Забезпечення належного рівня охорони праці [30] є критично важливим чинником ефективного та безпечного функціонування будь-якого промислового підприємства, особливо його механоскладальних цехів. Ці виробничі підрозділи характеризуються підвищеною небезпекою, що обумовлено специфікою технологічних процесів, зокрема, використанням металосбресних верстатів (токарних, фрезерних, свердлильних, шліфувальних). Науковий підхід до аналізу та мінімізації виробничих ризиків є основою для розробки та впровадження ефективних превентивних заходів, спрямованих на збереження життя та здоров'я персоналу, а також на підвищення загальної виробничої культури та продуктивності. Механоскладальні цехи, де здійснюється обробка матеріалів різанням та подальше складання вузлів, вимагають постійного моніторингу та вдосконалення системи управління охороною праці (УОП). Основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори при роботі на верстатах можна класифікувати як механічні, фізичні та психofізіологічні. Механічні небезпеки є найбільш поширеними і включають ризики травмування рухомими частинами обладнання (шпинделі, заготовки, інструмент, механізми подачі), а також небезпеку викиду стружки, осколків чи деталей, що обробляються. Для мінімізації цих ризиків необхідне неухильне дотримання вимог до огорожувальних та запобіжних пристроїв. Усі верстати повинні бути обладнані захисними кожухами, екранами та блокувальними системами, що унеможливають запуск обладнання при відкритих захисних елементах. Критично важливим є використання спеціалізованих інструментів для видалення стружки, які виключають прямий контакт рук оператора з зоною різання. Необхідно регулярно проводити технічне діагностування верстатного парку для виявлення та усунення потенційних несправностей, які можуть призвести до руйнування ріжучого інструменту або заготовки. Серед фізичних факторів особливе місце займають шум та вібрація. Тривалий вплив надмірного рівня шуму (вище 80 дБ) та вібрації (як загальної, так і

локальної) призводить до розвитку професійних захворювань, зокрема нейросенсорної туговухості та вібраційної хвороби. Заходи захисту включають використання індивідуальних засобів захисту (протишумні навушники, вкладки), впровадження технологій зниження шуму (звукоізолюючі екрани, антивібраційні опори верстатів) та регулярне проведення виробничого контролю параметрів фізичних факторів. Також значну небезпеку становить недостатнє або нерациональне освітлення робочої зони, що спричиняє швидку втому очей та збільшує ймовірність помилок і травм. Потрібне забезпечення нормованого рівня освітленості з урахуванням характеру зорової роботи. Електробезпека є окремим і важливим аспектом. Усі верстати повинні мати надійне заземлення та захист від короткого замикання. Кабелі та електропроводка повинні бути захищені від механічних пошкоджень та контакту з охолоджувальними рідинами. Оператори верстатів зобов'язані знати та дотримуватись правил безпечного поводження з електрообладнанням, що підтверджується відповідною кваліфікацією. Психологічні фактори включають напруженість праці, монотонність рухів та незручну робочу позу. Ці фактори можуть призводити до помилкових дій, зниження концентрації уваги та розвитку захворювань опорно-рухового апарату. Профілактичні заходи охоплюють раціональну організацію робочого місця (ергономіка), чергування видів діяльності, регламентовані переbrивки та виробничу гімнастику. Ключовим елементом УОП є навчання та інструктаж персоналу. Кожен оператор повинен пройти первинний, повторний та позаплановий інструктажі з охорони праці, які мають включати детальний розгляд інструкцій з експлуатації конкретного типу верстата, безпечних методів роботи, алгоритму дій у разі виникнення аварійних ситуацій та надання першої домедичної допомоги. Важливим є використання індивідуальних засобів захисту (ІЗЗ): захисних окулярів, спецодягу, спецвустя та за необхідності респіраторів (при роботі з емульсіями та мастилами). Спецодяг має бути приталеним, без елементів, що вільно звисають, для уникнення їхнього захоплення рухомими частинами верстата. Комплексний науково обґрунтований підхід до організації охорони праці у механоскладальних цехах є необхідною передумовою для мінімізації виробничого травматизму та професійної захворюваності. Ефективна система УОП повинна ґрунтуватися на

постійному аналізі ризиків, впровадженні інженерно-технічних рішень (захисні пристрої, зниження шуму, ергономіка), а також на навчанні та високій дисципліні персоналу. Тільки постійне вдосконалення превентивних заходів, що відповідає кращим світовим практикам, дозволить забезпечити стабільно високий рівень безпеки праці під час роботи на металообробних верстатах.

## 5.2 Екологічна експертиза

Проблема забезпечення екологічної безпеки виробничих процесів, зокрема в механоскладальних цехах, є надзвичайно актуальною. Комплексна екологічна експертиза [31] є ключовим інструментом для оцінки та мінімізації негативного впливу роботи верстатного обладнання на навколишнє середовище та здоров'я персоналу.

Проведення екологічної експертизи в умовах функціонування механоскладальних цехів вимагає систематичного аналізу ряду екологічних чинників, що генеруються в процесі металообробки на верстатах. Основними джерелами негативного впливу є викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря, скиди стічних вод, утворення відходів виробництва та фізичні фактори впливу (шум, вібрація).

Атмосферні викиди формуються переважно в результаті роботи обладнання, пов'язаного із застосуванням змащувально-охолоджувальних рідин (ЗОР). При високошвидкісній обробці відбувається випаровування та термічна деструкція компонентів ЗОР, що призводить до виділення в повітря аерозолів мастил, парів вуглеводнів та інших органічних сполук. Ступінь їхньої небезпеки залежить від хімічного складу ЗОР та ефективності систем вентиляції і очищення повітря. Експертиза повинна включати інвентаризацію джерел викидів, розрахунок гранично допустимих викидів (ГДВ) та моніторинг концентрацій забруднюючих речовин на робочих місцях і межі санітарно-захисної зони. Ключовим елементом є оцінка систем локального відсмоктування та фільтраційних установок (наприклад, електростатичних фільтрів або рукавних фільтрів) на предмет їхньої відповідності нормативним показникам ефективності.

Водокористування та скиди стічних вод також є об'єктом пильної уваги. Значні обсяги води використовуються для приготування та корекції робочих розчинів ЗОР, а також для миття деталей і прибирання. Стічні води від цих процесів можуть містити емульговані масла, важкі метали (якіно обробляються відповідні матеріали), поверхнево-активні речовини (ПАР) та інші забруднювачі. Експертиза має оцінити наявність та ефективність локальних очисних споруд, які зазвичай включають флотажні, коагуляційні або мембранні технології для розділення емульсій та видалення забруднюючих компонентів. Необхідно здійснити контроль за дотриманням нормативів гранично допустимого скиду (ГДС) у централізовані системи водовідведення або у водні об'єкти.

Управління відходами є критично важливим аспектом. Робота на верстаках генерує значні обсяги металевих стружки, відпрацьованих ЗОР, фільтруючих елементів та замасленого ганчір'я. Експертиза оцінює систему сортування, накопичення, обліку та передачі відходів спеціалізованим підприємствам на утилізацію або захоронення відповідно до класу небезпеки. Особлива увага приділяється відходам I-III класів небезпеки, до яких належать відпрацьовані масла та емульсії, з метою запобігання їхньому несанкціонованому потраплянню в навколишнє середовище.

Фізичні фактори впливу включають виробничий шум і вібрацію, які генеруються при роботі ріжучого інструменту, механізмів подачі та систем приводу верстатів. Екологічна експертиза в цьому контексті охоплює вимірювання рівнів шуму та вібрації на робочих місцях та порівняння їх із санітарними нормами. Рекомендації можуть включати впровадження шумопоглинальних екранів, антивібраційних опор або перехід на меншшумне обладнання.

Комплексна екологічна експертиза у механоскладальних цехах є не лише інструментом контролю, але й основою для розробки заходів щодо оптимізації виробничих процесів, впровадження найкращих доступних технологій (НДТ) та підвищення екологічної ефективності підприємства загалом.

Екологічна експертиза у механоскладальних цехах є необхідною передумовою для сталого функціонування виробництва. Вона дозволяє ідентифікувати, оцінити

та мінімізувати негативний вплив верстатної обробки на навколишнє середовище, забезпечуючи дотримання законодавчих вимог і збереження здоров'я працівників.

### 5.3 Економічна ефективність розробки

Виконано розрахунок економічної ефективності [32] з обробки заготовок для двох варіантів технологічних процесів (ТП), які відрізняються режимом обробки:

1)  $t_r = 0,5$  мм;  $S_{об} = 0,08$  мм/об;  $v = 250$  м/хв (режим обробки, призначений за каталогом РГ);

2)  $t_r = 1,0$  мм;  $S_{об} = 0,129 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$ ;  $v = 250$  м/хв (скоригований режим).

Оскільки в другому варіанті ТП величина подачі  $S_{об}$  більша, ніж у першому, при рівних значеннях швидкості  $v$  і глибини різання  $t_r$ , то в даному випадку машинний  $T_{маш}$  і штучний час  $T_{шт}$  будуть меншими, ніж у першому варіанті ТП, а продуктивність вищою.

Дані для розрахунку економічної ефективності наведені в табл. 5.1. Оптова ціна верстата – 1 500 000 грн. Сумарна встановлена потужність електродвигунів верстата – 167 кВт. Годинна тарифна ставка основного робітника – 200 грн.; годинна тарифна ставка наладчика – 250 грн. Вартість ріжучого інструменту – 2000 грн. Вартість 1 кВт · год електроенергії становить 4,32 грн./кВт · год.

Таблиця 5.1 – Дані для розрахунку економічної ефективності

Параметр	Перший варіант ТП	Другий варіант ТП
Режим різання	$t_r = 0,5$ мм; $S_{об} = 0,08 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$ ; $v = 250$ м/хв	$t_r = 1,0$ мм; $S_{об} = 0,129 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$ ; $v = 250$ м/хв
Машинний час $T_{маш}$ , хв	0,36	0,22
Штучний час $T_{шт}$ , хв	0,61	0,47
Продуктивність $Q$ , шт/хв	1,64	2,13
Річна програма випуску, шт	50000	50000

Річний економічний ефект розраховуємо за формулою:

$$E = (C_1 + E_H \cdot K_1) - (C_2 + E_H \cdot K_2), \quad (5.1)$$

де  $C_1, C_2$  – собівартість річного обсягу виробництва за першим і другим варіантом ТП, грн.;  $K_1, K_2$  – капітальні вкладення за першим варіантом і за другим варіантом ТП, грн.;  $E_H$  – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, приймаємо  $E_H = 0,15$ .

У даному випадку капітальні витрати для першого і другого варіантів ТП будуть рівними. Отже, річний економічний ефект визначається різницею собівартості витрат за першим і другим варіантами ТП.

Розрахунок технологічної собівартості виконаємо за формулою:

$$C_T = Z_o + Z_v + A + S_{ин} + S_{ел} + S_p + P_p, \quad (5.2)$$

де  $Z_o$  – заробітна плата основних робітників, грн.;  $Z_v$  – заробітна плата допоміжних робітників, грн.;  $A$  – амортизаційні відрахування на обладнання, грн.;  $S_{ин}$  – витрати на інструмент, грн.;  $S_{ел}$  – витрати на електроенергію, грн.;  $S_p$  – витрати на обслуговування і ремонт обладнання, грн.;  $P_p$  – інші загальновиробничі витрати, грн.

Таблиця 5.2 – Результати розрахунку економічної ефективності

Параметр	Перший варіант ТП	Другий варіант ТП
Заробітна плата основних робітників $Z_o$ , грн	3,82	2,94
Заробітна плата допоміжних робітників $Z_v$ , грн	14,25	12,06
Амортизаційні відрахування на обладнання $A$ , грн	0,74	0,45
Витрати на інструмент $S_{ин}$ , грн	2,67	2,70
Витрати на електроенергію $S_{ел}$ , грн	0,88	0,67
Витрати на обслуговування і ремонт обладнання $S_p$ , грн	0,03	0,02
Витрати на налаштування інструментів поза верстатом $S_H$ , грн	0,02	0,02
Інші загальновиробничі витрати $P_p$ , грн	0,96	0,74
Технологічна собівартість деталі, грн	24,37	19,60

Технологічна собівартість річної програми випуску, грн	1218500	980000
Річний економічний ефект, грн	238500	

Таким чином, річний економічний ефект для однієї операції склав 238,5 тис. грн. на один верстат.

### Висновки до розділу 5

1. Розроблено алгоритми та програмне забезпечення для корекції режиму точіння, які дозволяють визначити режим обробки з урахуванням зміни параметрів процесу в часі.

2. Проведено дослідження ефективності розробленої методики для корекції режиму точіння в лабораторних умовах. Корекція режиму різання дозволила забезпечити збільшення продуктивності обробки на 25 ... 30 % без урахування і на 30 ... 35% з урахуванням змінних у часі параметрів процесу обробки при забезпеченні необхідної якості деталей при обробці жорстких валів (відношення  $l_{\text{заг}}/d$  не перевищує 4) і консольному закріпленні заготовки.

3. Виконано розрахунок економічної ефективності від застосування результатів досліджень у промисловості. При корекції режиму різання в процесі налагодження технологічного процесу виготовлення деталі «Вал» при річній програмі випуску 50000 шт. розрахунковий річний економічний ефект склав 238500 грн. на один верстат.

## ВИСНОВКИ

1. Розроблено методики корекції елементів режиму процесу механічної обробки, призначених в умовах невизначеності технологічної інформації, що враховують технологічні параметри процесу, які змінюються в часі. Варіювання керованими факторами в процесі корекції використовується для їх наближення до оптимального рівня та активного вивчення процесу з метою корекції математичних моделей.

2. Розроблено математичні моделі для розрахунку математичного очікування і розсіювання параметрів процесу точіння: діаметрального розміру, параметра мікрогеометрії обробленої поверхні, тангенціальної складової сили різання і температур різання. Моделі враховують зміну механічних і теплофізичних властивостей матеріалів заготовки і інструменту в залежності від температури в зоні обробки.

3. Виконано чисельне моделювання параметрів процесу точіння. Встановлено вплив зносу різця на контактні температури і тангенціальну складову силу різання. Встановлено, що при розкіді значень напруги пластичності матеріалу заготовки в межах 20% діапазон розсіювання сили різання і контактних температур при точінні становить 18 ... 20%.

4. Отримано залежності для розрахунку часткових похідних, що використовуються у формулах для визначення інтервалу варіювання керованими параметрами в процесі корекції режиму.

5. Розроблено алгоритми та програмне забезпечення для розрахунку середніх арифметичних значень і меж миттєвих полів розсіювання фактичних значень вихідних параметрів і істотних показників процесу точіння, що змінюються зі збільшенням часу нагрівання інструменту.

6. Проведено апробацію розробленої методики корекції режиму точіння. Корекція режиму точіння дозволила забезпечити збільшення продуктивності обробки на 25 ... 30 % без урахування і на 30 ... 35% з урахуванням змінних у часі параметрів процесу при забезпеченні заданої якості деталей.

7. Результати дослідно-промислових випробувань методики корекції режиму точіння показали, що її застосування дозволяє збільшити продуктивність обробки на 25% при забезпеченні необхідної якості деталей.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hadi Y., Ahmed S.G. Assessment of Surface Roughness Model for Turning Process. In: Wang, K., Kovacs, G.L., Wozny, M., Fang, M. (eds) Knowledge Enterprise: Intelligent Strategies in Product Design, Manufacturing, and Management. PROLAMAT 2006. IFIP International Federation for Information Processing. Springer, Boston, MA, 2006. Vol. 207. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3440-3\\_19](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3440-3_19)
2. Alajmi M.S., Almeshal A.M. Modeling of cutting force in the turning of AISI 4340 using gaussian process regression algorithm. *Applied Sciences*, 2021. Vol. 11, No. 9. P. 4055. <https://doi.org/10.3390/app11094055>
3. Tang L., Cheng Z., Huang J. Empirical models for cutting forces in finish dry hard turning of hardened tool steel at different hardness levels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014. Vol. 76. P. 691–703. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6291-8>
4. Khlifi H., Abdellaoui L., Bouzid S. W. Prediction of Cutting Force and Surface Roughness in Turning Using Machine Learning. In: Sai, L., et al. (eds) Proceedings of the 2nd International Conference on Innovative Materials, Manufacturing, and Advanced Technologies IMAT 2022. *Mechanisms and Machine Science*. Springer, Cham, 2024. Vol. 144. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-42659-9\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-031-42659-9_24)
5. Shnfir M., Olufaye G.A., Jomaa W., Songmene V. Machinability Study of Hardened 1045 Steel When Milling with Ceramic Cutting Inserts. *Materials*, 2019. Vol. 12, No. 23. P. 3974. <https://doi.org/10.3390/ma12233974>
6. Liang S. Y., Hecker R. L., Landers R. G. Machining Process Monitoring and Control: The State-of-the-Art. *Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of The Asme*, 2004. 126(2), 297–310. <https://doi.org/10.1115/1.1707035>
7. Quintana G., Ciurana J. Chatter in machining processes: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011. Vol. 51. Issue 5. Pp. 363-376. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.01.001>.
8. Vogl G. W., Calamari M., Ye S., Donmez M. A. A Sensor-based Method for Diagnostics of Geometric Performance of Machine Tool Linear Axes. *Procedia Manufacturing*, 2016. Vol. 5. Pp. 621-633. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.051>

9. Zhang Y., Qi X., Wang T., He Y. Tool Wear Condition Monitoring Method Based on Deep Learning with Force Signals. *Sensors*, 2023. Vol. 23(10). Pp. 4595. <https://doi.org/10.3390/s23104595>

10. Suresh P.V.S., Venkateswara Rao P., Deshmukh S.G. A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002. Vol. 42(6). Pp. 675-680. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00005-6](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00005-6)

11. José C. O., Dias A. M., Lebrun J. L., Astakhov V. Machining residual stresses in AISI 316l steel and their correlation with the cutting parameters. *Machining Science and Technology*, 2002. Vol. 6. Pp. 251-270. <https://doi.org/10.1081/MST-120005959>

12. Abukhshin N.A., Mativenga P.T., Sheikh M.A. Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005. Vol. 46(7-8). Pp. 782-800. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.07.024>

13. Espinoza-Torres I., Martínez-Ramírez I., Sierra-Hernández J.M., Jauregui-Vazquez D., Gutiérrez-Rivera M.E., Carmen FdJT-D., Lozano-Hernández T. Measurement of Cutting Temperature in Interrupted Machining Using Optical Spectrometry. *Sensors*, 2023. Vol. 23(21). Pp.8968. <https://doi.org/10.3390/s23218968>

14. Astakhov, V., Outeiro, J. Metal Cutting Mechanics, Finite Element Modelling. In: *Machining*. Springer, London, 2008. [https://doi.org/10.1007/978-1-84800-213-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-84800-213-5_1)

15. Oxley P. L. B., Shaw M. C. Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability. *ASME J. Appl. Mech.* 1990. Vol. 57(1). Pp. 253. <https://doi.org/10.1115/1.2888318>

16. Childs T., Obikawa T., Maekawa K., Yamane Y. Metal Machining. *Butterworth-Heinemann*, 2000. ISBN 978-0-08-052402-3.

17. Warren K. DeVries Analysis of Material Removal Processes. *Springer New York*, 1991. ISBN 780387977287.

18. Yue C., Gao H., Liu X., Liang S. Y., Wang L. A review of chatter vibration research in milling. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019. Vol. 32(2). Pp. 215-242. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.11.007>

19. Stephenson D.A., Agapiou J.S. *Metal Cutting Theory and Practice* (3rd ed.). *CRC Press*, 2016. <https://doi.org/10.1201/9781315373119>
20. *Modern Metal Cutting : a practical handbook*. *Sandvik Coromant*, 1994. ISBN-10: 9197229903.
21. Trent E. M., Wright P. K. *Metal Cutting* (4th ed.). *Butterworth–Heinemann*, 2000. ISBN 0-7506-7069-X.
22. Huang Y., Liang S.Y. Cutting forces modeling considering the effect of tool thermal property – application to CBN hard turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005. Vol. 43(3). Pp. 307-315. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00185-2](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00185-2)
23. Ramesh R., Mannan M.A., Poo A.N. Error compensation in machine tools – a review: Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000. Vol. 40(9). Pp. 1235-1256. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(00\)00009-2](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00009-2)
24. He K., Hong H., Tang R., Wei J. Analysis of Multi-Objective Optimization of Machining Allowance Distribution and Parameters for Energy Saving Strategy. *Sustainability* 2020. Vol. 12(2). Pp. 533. <https://doi.org/10.3390/su12020638>
25. Asiltürk İ., Akkuş H. Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method. *Measurement*, 2011. Vol. 44(9). Pp. 1697-1704. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.07.003>.
26. Chen K. S., Hsu C. H., Chiou K. C. Product quality evaluation by confidence intervals of process yield index. *Sci Rep.*, 2022. Vol. 12(1). Pp. 10508. doi: 10.1038/s41598-022-14595-y.
27. Fisher R. A. *Statistical Methods for Research Workers*. In: Kotz, S., Johnson, N.L. (eds) *Breakthroughs in Statistics*. Springer Series in Statistics. *Springer*, New York, NY, 1992. [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4380-9\\_6](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4380-9_6)
28. Dimic D. E. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations – a review of methods. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000. Vol. 40(8). Pp. 1073-1098. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00122-4](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00122-4)

29. Arsecularatne J.A., Mathew P., Oxley PLB. Prediction of Chip Flow Direction and Cutting Forces in Oblique Machining with Nose Radius Tools. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*. 1995. Vol. 209(4). Pp. 305-315. doi:10.1243/PIME\_PROC\_1995\_209\_087\_02

30. Про охорону праці : Закон України від 14.10.92 р. № 2695-XII. Дата оновлення: 12.09.2025. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text> (дата звернення: 25.09.2025).

31. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 26.06.91 р. № 1268-XII. Дата оновлення: 08.03.2025. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text> (дата звернення: 21.10.2025).

32. Тіхонов С. В., Рибалко І. М., Колпаченко Н. М. Техніко-економічна оцінка конструкторської розробки пристосування : методичні вказівки до виконання практичної роботи студентам, які навчаються за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування. Харків. нац. техн. ун-т сіл. госп-ва ім. П. Василенка, 2021. 22 с.